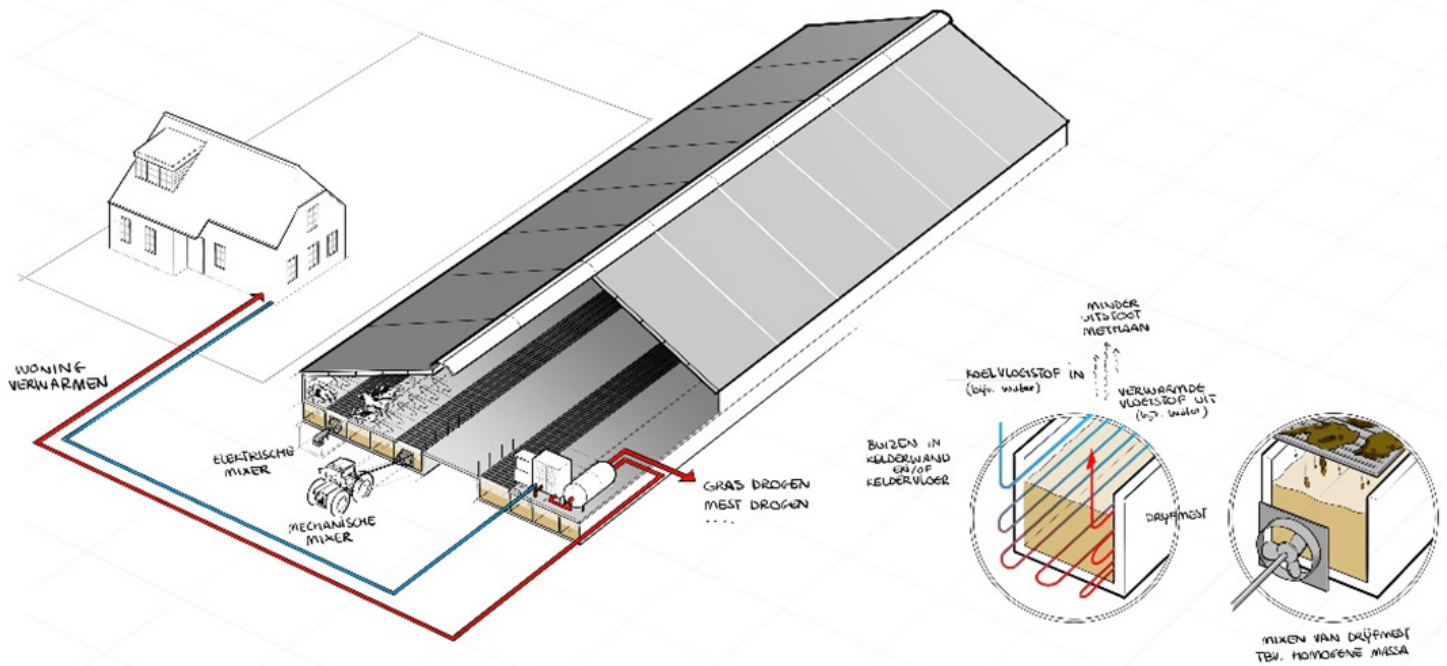


AANPASSING MELKVEESTALLEN VOOR MINDER METHAAN  
MEST KOELEN



# Milieutechnologieën in de melkveehouderij tegen klimaatverandering

Testen en bemeten van (bijna) praktijkrijpe combinaties van technieken om methaanemissie uit mest in bestaande melkveestallen te verminderen

Daniel Puente-Rodríguez, A.P. (Bram) Bos & Jan Vonk

Openbaar  
Rapport 1419



**WAGENINGEN**  
UNIVERSITY & RESEARCH



---

# Milieutechnologieën in de melkveehouderij tegen klimaatverandering

Testen en bemeten van (bijna) praktijkrijpe combinaties van technieken om methaanemissie uit mest in bestaande melkveestallen te verminderen

Daniel Puente-Rodríguez, A.P. (Bram) Bos & Jan Vonk

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 105 B1 Emissiereductie methaan veehouderij (projectnummer BO-43-105-020).

Wageningen Livestock Research  
Wageningen, Mei 2023

---

Rapport 1419

---

Puente-Rodríguez, D., A.P. Bos, J. Vonk, 2023. *Milieutechnologieën in de melkveehouderij tegen klimaatverandering; Testen en bemeten van (bijna) praktijkrijpe combinaties van technieken om methaanemissie uit mest in bestaande melkveestallen te verminderen*. Wageningen Livestock Research, Rapport 1419.

#### Samenvatting NL

Het project 'Aanpassing Melkveestallen voor Minder Methaan' test en bemeet in de praktijk technieken/maatregelen, of combinaties daarvan die in 2021 (bijna) praktijkrijp zijn, om de methaanemissie uit opgeslagen mest in bestaande melkveestallen met een traditionele roostervloer en mestkelder sterk te verminderen. In dit rapport worden de resultaten van vier combinaties van maatregelen gepresenteerd, namelijk: (1) mest koelen, (2) drijfmest mixen door middel van lucht, (3) mest scheiden en dikke fractie gecontroleerd composteren en (4) primaire scheiding + vaste mest.

#### Summary UK

The project 'Adapting dairy barns to reduce methane' is testing and measuring techniques/measures, or combinations thereof that are (almost) ready for use in 2021, meant to significantly reduce the methane emission from manure in dairy barns with traditional slatted floors and a manure pit. This report introduces the results regarding: (1) Cooling manure, (2) mixing manure with air, (3) separating manure and controlled composting of solid fraction and (4) primary separation of manure fractions + solid manure.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/629797> of op [www.wur.nl/livestock-research](http://www.wur.nl/livestock-research) (onder Wageningen Livestock Research publicaties).



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

© Wageningen Livestock Research, onderdeel van Stichting Wageningen Research, 2023

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

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

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

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

Wageningen Livestock Research Rapport 1419

---

# Inhoud

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inleiding</b>   | <b>5</b>  |
| 1.1      | Principes en maatregelen – de longlist                             | 8         |
| 1.2      | Monovergisting van mest  | 12        |
| 1.2.1    | Principe & ervaringen  | 12        |
| 1.2.2    | Randvoorwaarden voor (mono)vergisting van mest op melkveebedrijven | 12        |
| <b>2</b> | <b>Mest koelen</b>   | <b>14</b> |
| 2.1      | Principe & ervaringen  | 14        |
| 2.2      | Methodologische aanpak   | 16        |
| 2.2.1    | Melkveebedrijven   | 16        |
| 2.3      | Broeikasgas- en ammoniakemissiemetingen                            | 19        |
| 2.4      | Resultaten   | 20        |
| 2.5      | Conclusies, discussie en reflectie                                 | 25        |
| <b>3</b> | <b>Mest scheiden en dikke fractie gecontroleerd composteren</b>    | <b>28</b> |
| 3.1      | Principe & ervaringen  | 28        |
| 3.2      | Kritische aspecten van beschikbare technieken                      | 29        |
| 3.3      | Systeembeschrijving  | 30        |
| 3.4      | Lab analyses   | 31        |
| 3.4.1    | Materialen en methode  | 31        |
| 3.5      | Resultaten   | 33        |
| 3.6      | Conclusies   | 35        |
| 3.7      | 'Don't throw the baby out with the bathwater' – reflectie          | 35        |
| <b>4</b> | <b>Mest mixen met lucht</b>  | <b>37</b> |
| 4.1      | Principe & ervaringen  | 37        |
| 4.2      | Systeembeschrijving  | 37        |
| 4.3      | Methodologische aanpak   | 39        |
| 4.3.1    | Lab analyses   | 40        |
| 4.3.2    | Broeikasgas- en ammoniakemissiemetingen                            | 41        |
| 4.4      | Resultaten   | 41        |
| 4.4.1    | Lab analyses   | 41        |
| 4.4.2    | Emissie metingen   | 43        |
| 4.5      | Conclusie en reflectie   | 44        |
| <b>5</b> | <b>Primaire scheiding + vaste mest</b>                             | <b>46</b> |
| 5.1      | Principe & ervaringen  | 46        |
| 5.2      | Systeembeschrijving – Het Kwatrijn                                 | 47        |
| 5.3      | Methodologische aanpak   | 48        |
| 5.3.1    | Broeikasgassen en ammoniak   | 48        |
| 5.3.2    | AMP & BMP bepalingen   | 50        |
| 5.4      | Resultaten   | 51        |
| 5.4.1    | AMP  | 51        |
| 5.4.2    | BMP  | 51        |
| 5.4.3    | Broeikasgas en ammoniakemissiemetingen                             | 52        |
| 5.5      | Discussie en reflectie   | 54        |

---

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>6</b> | <b>Inzichten rondom dierenwelzijn bij 'dichte' loopvloeren in melkveestallen</b>            | <b>56</b> |
| <b>7</b> | <b>Kansen en belemmeringen voor adoptie</b>   | <b>58</b> |
|          | 7.1 Aanpak  | 58        |
|          | 7.2 Belangrijkste adoptiefactoren   | 58        |
|          | 7.3 Stakeholderconsultatie  | 62        |
|          | 7.4 Conclusies  | 65        |
| <b>8</b> | <b>Conclusies en discussie</b>  | <b>67</b> |
|          | <b>Dankwoord</b>  | <b>70</b> |
|          | <b>Literatuur</b>   | <b>71</b> |
|          | <b>Bijlage 1 – Gebruikte analysemethoden WLR sevicelab en resultaten mestmonsters</b>       | <b>76</b> |
|          | <b>Bijlage 2 - Overzicht van adoptiefactoren per maatregel/techniek (expertconsultatie)</b> | <b>79</b> |

---

# 1 Inleiding

Methaan (CH<sub>4</sub>) en andere broeikasgassen (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O) zijn essentieel voor het leven op aarde. Ze absorberen en houden de straling van de zon en aardwarmte vast om vervolgens deze geleidelijk weer aan de atmosfeer af te geven. Zonder broeikasgassen (BKG) zou de gemiddelde temperatuur op aarde circa 30 graden lager zijn dan nu het geval is. Echter, door wereldwijde economische en industriële ontwikkelingen sinds de industriële revolutie worden te veel BKG uitgestoten waardoor meer warmte in de atmosfeer blijft. Dit versterkte broeikaseffect is het belangrijkste mechanisme van klimaatverandering.<sup>1</sup>

De landen die het Klimaatakkoord van Parijs (2015) hebben getekend hebben afgesproken een temperatuurstijgingsplafond van maximaal 2 °C te hanteren, met het doel te streven naar maximaal 1,5 °C. In 2016 heeft Nederland, samen met de andere Europese landen, het Klimaatakkoord ondertekend. In dit kader heeft de Europese Unie de doelstelling om in 2030 de BKG-emissies ten opzichte van 1990 met 40% te reduceren. De Nederlandse overheid heeft als doel een nationale reductie van 49% te realiseren (en 95% minder in 2050 ten opzichte van 1990),<sup>2</sup> zoals vastgelegd is in de Klimaatwet.<sup>3</sup> Het Parijsakkoord is juridisch bindend, maar ook van de rechter moet Nederland haar BKG-uitstoot reduceren. In 2015 en in hoger beroep in 2018 heeft de rechter, en in 2019 de Hoge Raad bepaald dat de Nederlandse Staat erop moet toezien dat in 2020 25% minder BKG worden uitgestoten ten opzichte van 1990.<sup>4</sup>

Ook de veehouderij moet haar bijdrage leveren. De FAO heeft berekend dat de veehouderij wereldwijd verantwoordelijk is voor 14% van de door mensen geproduceerde ('*human-induced*') BKG (Gerber et al., 2013). Reisinger et al. (2017) schatten dat de veehouderij ongeveer 19% van de totale gemodelleerde opwarming van 0,81 °C van alle antropogene bronnen in 2012 bijdroeg. Er wordt geschat dat vóór 2029 de broeikasgasemissies van de landbouw met 6% zullen toenemen en dat de veehouderij verantwoordelijk zal zijn voor 80% van deze toename (OECD/FAO, 2020). De Nederlandse veehouderij stoot jaarlijks 18,5 Mton aan CO<sub>2</sub>-eq<sup>5</sup> uit, waarvan 13 Mton in de vorm van CH<sub>4</sub> (RVO – 2018). In het Coalitieakkoord 2021 is het reductiedoel verhoogd naar 55%, met als ambitie een reductie van 60% in 2030.

In 2015 stootte Nederland in totaal 193,2 megaton CO<sub>2</sub>-eq uit, in 2017 was dit 191,1 en in 2019 180,7. In 2020 bedroeg de totale hoeveelheid broeikasgassen die naar de lucht is uitgestoten 164,3 megaton CO<sub>2</sub>-eq. Dat is rond 25% lager dan de 220 Mton uitgestoten in 1990 (Ruysenaars et al., 2022) (zie Figuur 1).<sup>6</sup> In principe zou de uitstoot van broeikasgassen in 2020 niet boven 166, en in 2030 niet boven 113 Mton CO<sub>2</sub>-eq<sup>7</sup> mogen uitkomen. De uitstoot van CO<sub>2</sub> is 15% gedaald ten opzichte van 1990. De uitstoot van andere broeikasgassen (zoals methaan, distikstofoxide, etc.) is sinds het referentiejaar met 54,9% gedaald (ibid.).

---

<sup>1</sup> [www.ipcc.ch/](http://www.ipcc.ch/) (geraadpleegd september 2021).

<sup>2</sup> [www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/klimaatbeleid](http://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/klimaatbeleid) (geraadpleegd september 2020).

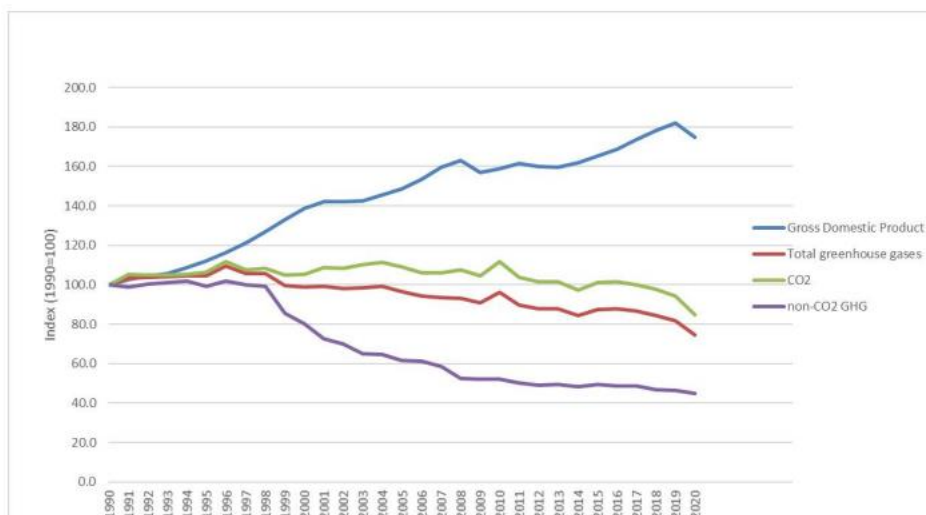
<sup>3</sup> <https://wetten.overheid.nl/BWBR0042394/2020-01-01> (geraadpleegd september 2020).

<sup>4</sup> Dit komt uit een door Urgenda (en andere mede-eisers) tegen de Nederlandse Staat aangespannen rechtszaak. Zie: [www.urgenda.nl/themas/klimaat-en-energie/klimaatzaak/](http://www.urgenda.nl/themas/klimaat-en-energie/klimaatzaak/) (geraadpleegd september 2021).

<sup>5</sup> CO<sub>2</sub>-equivalent wordt gebruikt als maat om de bijdrage van broeikasgassen aan klimaatverandering weer te geven. Koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) = 1 CO<sub>2</sub>-eq, lachgas (N<sub>2</sub>O) = 298 CO<sub>2</sub>-eq en methaan (CH<sub>4</sub>) = 25 CO<sub>2</sub>-eq conform het momenteel gehanteerde vierde assessment rapport (AR4).

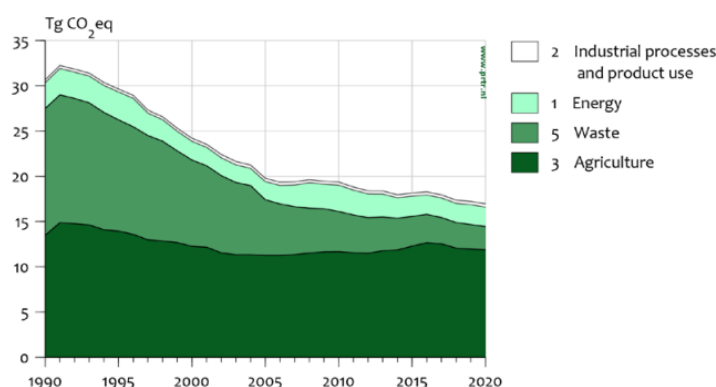
<sup>6</sup> [www.emissieregistratie.nl/erpubliek/erpub/international/broeikasgassen.aspx](http://www.emissieregistratie.nl/erpubliek/erpub/international/broeikasgassen.aspx) (geraadpleegd januari 2022).

<sup>7</sup> [www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2018/19/uitstoot-broeikasgassen-in-2017-licht-afgenomen](http://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2018/19/uitstoot-broeikasgassen-in-2017-licht-afgenomen) (geraadpleegd juni 2018).



**Figuur 1** Verloop van broeikasgasemissies en GDP ('Gross Domestic Product') tussen 1990 en 2020 (Ruysenaars et al., 2022).

De methaanemissie van de landbouw daalde 18,8% tussen 1990 en 2020. Deze emissie daalde met 23,2% tussen 1990 en 2005 om vervolgens weer licht te stijgen (zie Figuur 2). Na 2016 zijn de enterische methaanemissies (door pens- en darmfermentatie) en die uit de mest weer gedaald (Ruysenaars et al., 2022). De reden hiervoor is de daling in het aantal melkkoeien en varkens (ibid.).



**Figuur 2** Verloop methaanemissie 1990-2020 (Ruysenaars et al., 2022).

De land- en tuinbouw is verantwoordelijk voor de emissie van 10 tot 15% van de broeikasgassen, exclusief de emissies door landgebruik(-sveranderingen). Het gaat hierbij alleen om de emissies van het productieproces zelf, emissies door bijvoorbeeld de opwekking van energie worden onder een andere categorie gerapporteerd. De doelstelling van de Klimaatwet van 2018 waarin het nationaal Klimaat- en Energieakkoord wordt verankerd, is om in de landbouw tot 2030 3,5 Mton CO<sub>2</sub>-eq te reduceren door middel van een aantal maatregelen: 1,5 Mton reductie door slimmer landgebruik, en 1 Mton reductie binnen de glastuinbouw. In het Klimaatakkoord (blz. 119) is verder een reductieopgave van 1,2 - 2,7 Mton CO<sub>2</sub>-eq voor 2030 afgesproken voor de gehele veehouderij. Daarnaast is in het regeerakkoord (blz. 38) opgenomen dat dit tenminste 1 Mton CO<sub>2</sub>-eq emissiereductie van methaan moet betreffen. De landbouw is verantwoordelijk voor 70,1% van de nationale methaanemissie (en 73,4% N<sub>2</sub>O) in 2020 (Ruysenaars et al., 2022).

Dit rapport heeft betrekking op het doel om 1 Mton CO<sub>2</sub>-eq reductie in methaanuitstoot binnen de veehouderij te bereiken per 2030. Van de jaarlijks 13 Mton aan CO<sub>2</sub>-eq door de veehouderij uitgestoten methaan betreft dit 8 Mton enterisch methaan en 5 Mton uit mestopslagen. De melkveehouderij en varkenshouderij leveren de grootste bijdrage aan de totale uitstoot van methaan.



Rundvee produceert bijna 80% van de methaanemissies uit de Nederlandse veehouderij. Bij melkvee wordt ingeschat dat 20-25% van de totale methaanemissie uit de mest komt.

**Tabel 1** Verdeling en ontwikkeling van de BKG-emissies per gas en bron binnen de landbouw (Ruysenaars et al., 2022).

| Sector/category   | Gas              | Emissions in Tg CO <sub>2</sub> eq |       |       | 2020 vs 1990 | Contribution to total in 2020 (%) by |           |                          |
|---|------------------|------------------------------------|-------|-------|--------------|--------------------------------------|-----------|--------------------------|
|   |                  | 1990                               | 2019  | 2020  | %            | sector                               | total gas | total CO <sub>2</sub> eq |
| 3. Agriculture  | CO <sub>2</sub>  | 0.2                                | 0.1   | 0.1   | -57.6%       | 0.4%                                 | 0.1%      | 0.0%                     |
|   | CH <sub>4</sub>  | 13.5                               | 12.0  | 11.9  | -11.9%       | 67.3%                                | 8.6%      | 7.2%                     |
|   | N <sub>2</sub> O | 9.7                                | 5.7   | 5.7   | -41.1%       | 32.2%                                | 4.1%      | 3.5%                     |
|   | All              | 23.3                               | 17.7  | 17.7  | -24.3%       | 100.0%                               |           | 10.7%                    |
| 3A. Enteric fermentation                                    | CH <sub>4</sub>  | 9.2                                | 8.1   | 8.2   | -11.2%       | 46.4%                                | 48.3%     | 5.0%                     |
| 3B. Manure management                                       | CH <sub>4</sub>  | 5.4                                | 3.8   | 3.7   | -32.2%       | 20.9%                                | 21.7%     | 2.2%                     |
|   | N <sub>2</sub> O | 0.9                                | 0.8   | 0.8   | -16.2%       | 4.5%                                 | 10.1%     | 0.5%                     |
|   | All              | 6.4                                | 4.6   | 4.5   | -29.8%       | 25.3%                                |           | 2.7%                     |
| 3D. Agriculture soils                                       | N <sub>2</sub> O | 8.7                                | 4.9   | 4.9   | -43.7%       | 27.8%                                | 63.3%     | 3.0%                     |
| 3G. Liming  | CO <sub>2</sub>  | 0.2                                | 0.04  | 0.03  | -83.1%       | 0.2%                                 | 0.0%      | 0.0%                     |
| 3H. Urea application  | CO <sub>2</sub>  | 0.00                               | 0.05  | 0.05  | 3014.0%      | 0.3%                                 | 0.0%      | 0.0%                     |
| National Total GHG emissions (excl. CO <sub>2</sub> LULUCF) | CO <sub>2</sub>  | 162.7                              | 153.5 | 138.3 | -15.0%       |                                      |           |                          |
|   | CH <sub>4</sub>  | 31.8                               | 17.2  | 17.0  | -46.7%       |                                      |           |                          |
|   | N <sub>2</sub> O | 17.5                               | 7.9   | 7.8   | -55.6%       |                                      |           |                          |
|   | total*           | 220.5                              | 180.3 | 164.3 | -25.5%       |                                      |           |                          |

\*including f-gases

**Tabel 2** Verloop en verdeling van (3A) de enterische methaanemissie bij herkauwers en (3B) de methaanemissie uit mestmanagement (Ruysenaars et al., 2022).

| Sector/category                 | Gas                   | Emissions in Tg CO <sub>2</sub> eq |      |      | 2020 vs 1990 | Contribution to total in 2020 (%) by |           |                          |
|---------------------------------|-----------------------|------------------------------------|------|------|--------------|--------------------------------------|-----------|--------------------------|
|                                 |                       | 1990                               | 2019 | 2020 | %            | sector                               | total gas | total CO <sub>2</sub> eq |
| 3A. Enteric fermentation        | CH <sub>4</sub>       | 9.2                                | 8.1  | 8.2  | -11.2%       | 46.4%                                | 48.3%     | 5.0%                     |
| 3A1. Cattle                     | CH <sub>4</sub>       | 8.2                                | 0.2  | 7.3  | -11.0%       | 41.3%                                | 43.0%     | 4.4%                     |
| <b>3A1. Mature dairy cattle</b> | <b>CH<sub>4</sub></b> | 5.2                                | 5.5  | 5.5  | 5.1%         | 30.9%                                | 32.1%     | 3.3%                     |
| <b>3A1. Other mature cattle</b> | <b>CH<sub>4</sub></b> | 0.2                                | 0.1  | 0.1  | -46.0%       | 0.6%                                 | 0.7%      | 0.1%                     |
| <b>3A1. Growing cattle</b>      | <b>CH<sub>4</sub></b> | 2.8                                | 1.7  | 1.7  | -38.1%       | 9.8%                                 | 10.2%     | 1.1%                     |
| 3A2. Sheep                      | CH <sub>4</sub>       | 0.3                                | 0.2  | 0.2  | -43.9%       | 1.1%                                 | 1.1%      | 0.1%                     |
| 3A3. Swine                      | CH <sub>4</sub>       | 0.5                                | 0.4  | 0.4  | -14.8%       | 2.5%                                 | 2.6%      | 0.3%                     |
| 3A4. Other livestock            | CH <sub>4</sub>       | 0.2                                | 0.3  | 0.3  | 51.5%        | 1.5%                                 | 1.6%      | 0.2%                     |

| Sector/category         | Gas              | Emissions in Tg CO <sub>2</sub> eq |      |      | 2020 vs 1990 | Contribution to total in 2020 (%) by |           |                          |
|-------------------------|------------------|------------------------------------|------|------|--------------|--------------------------------------|-----------|--------------------------|
|                         |                  | 1990                               | 2019 | 2020 | %            | sector                               | total gas | total CO <sub>2</sub> eq |
| 3B. Manure management   | CH <sub>4</sub>  | 5.4                                | 3.8  | 3.7  | -32.2%       | 20.9%                                | 21.7%     | 2.2%                     |
|                         | N <sub>2</sub> O | 0.9                                | 0.8  | 0.8  | -16.2%       | 4.5%                                 | 10.1%     | 0.5%                     |
|                         | All              | 6.4                                | 4.6  | 4.5  | -29.8%       | 25.3%                                |           | 2.7%                     |
| 3B1. Cattle (total)     | CH <sub>4</sub>  | 1.6                                | 2.0  | 1.9  | 18.9%        | 10.8%                                | 11.3%     | 1.2%                     |
| 3B2. Sheep              | CH <sub>4</sub>  | 0.0                                | 0.0  | 0.0  | -43.9%       | 0.0%                                 | 0.0%      | 0.0%                     |
| 3B3. Swine              | CH <sub>4</sub>  | 3.4                                | 1.8  | 1.7  | -50.2%       | 9.5%                                 | 9.9%      | 1.0%                     |
| 3B4. Poultry            | CH <sub>4</sub>  | 0.4                                | 0.1  | 0.1  | -84.0%       | 0.4%                                 | 0.4%      | 0.0%                     |
| 3B4. Other livestock    | CH <sub>4</sub>  | 0.0                                | 0.0  | 0.0  | 2.0%         | 0.1%                                 | 0.2%      | 0.0%                     |
| 3B1. Cattle (total)     | N <sub>2</sub> O | 0.3                                | 0.3  | 0.3  | 1.0%         | 2.0%                                 | 4.5%      | 0.2%                     |
| 3B2. Sheep              | N <sub>2</sub> O | 0.0                                | 0.0  | 0.0  | -76.3%       | 0.0%                                 | 0.0%      | 0.0%                     |
| 3B3. Swine              | N <sub>2</sub> O | 0.1                                | 0.1  | 0.1  | -30.2%       | 0.6%                                 | 1.3%      | 0.1%                     |
| 3B4. Poultry            | N <sub>2</sub> O | 0.0                                | 0.0  | 0.0  | -13.1%       | 0.1%                                 | 0.3%      | 0.0%                     |
| 3B4. Other livestock    | N <sub>2</sub> O | 0.0                                | 0.1  | 0.1  | 137.1%       | 0.4%                                 | 1.0%      | 0.0%                     |
| 3B5. Indirect emissions | N <sub>2</sub> O | 0.4                                | 0.2  | 0.2  | -37.7%       | 1.4%                                 | 3.1%      | 0.1%                     |

---

Specifieker nog, binnen dit project gaat het over de reductie van methaan uit mest in melkveebedrijven met traditionele roostervloeren en mestkelders. Meer dan 80% van de melkkoeien in Nederland wordt gehuisvest in dit staltype.

Het doel van dit onderzoek is om technieken, of combinaties daarvan die in 2021 (bijna) praktijkrijp waren in de praktijk te testen en te bemeten, om in bestaande melkveestallen met een traditionele roostervloer de methaanemissie uit opgeslagen mest sterk te verminderen. Interessante technieken zijn bijvoorbeeld mestkoeling, het frequent afvoeren van mest uit de kelders, het grondig reinigen van de kelders, het afsluiten en afzuigen van de kelders en het minder schadelijk maken (oxideren tot CO<sub>2</sub>) van methaan. We beoordelen deze combinaties van maatregelen niet alleen op hun technische potentie, het is ook van groot belang dat de technieken makkelijk zijn in te passen in de bedrijfsvoering, bedrijfseconomisch verantwoord (eventueel met subsidie) zijn toe te passen, en geen negatieve effecten hebben op ammoniak- en andere broeikasgasemissies, koe-gezondheid en dierenwelzijn of de gezondheid van veehouders en omwonenden.

Dit onderzoek werd gefinancierd door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoeksprogramma 'Integraal Aanpakken'<sup>8</sup> en uitgevoerd door Wageningen Livestock Research in samenwerking met Wageningen Economic Research, Land- en Tuinbouw Organisatie Nederland (LTO) en Schuttelaar & Partners.

Let wel, bij de combinaties van in de praktijk bemeten maatregelen zijn de resultaten indicatief. De metingen werden uitgevoerd met meetmethoden die deels nog in ontwikkeling zijn. Ook werd doorlopend gemeten, waarbij er intussen bij verschillende systemen aanpassingen werden gedaan om het systeem te verbeteren of te voldoen aan specifieke wensen van de ondernemer, etc. De gehanteerde protocollen en veranderingen evenals de resultaten worden hieronder gepresenteerd.

De volgende paragraaf vat de inventarisatie van kansrijke maatregelen samen om methaanemissie uit mest in de melkveehouderij te reduceren. Daarna worden in de volgende hoofdstukken de beschrijving van technieken, methodologie, resultaten van de metingen en conclusie/reflectie van de volgende combinaties van maatregelen uitgewerkt: Hoofdstuk 2 mest koelen, Hoofdstuk 3 mest primair scheiden en dikke fractie gecontroleerd composteren, Hoofdstuk 4 mest mixen met lucht, Hoofdstuk 5 mest scheiden + vaste mest. Hoofdstuk 6 geeft inzichten rondom dierenwelzijn bij loopvloeren. Hoofdstuk 7 kijkt naar de kansen en belemmeringen voor de brede adoptie van deze combinaties. In het laatste hoofdstuk wordt gereflecteerd over de betekenis van deze maatregelen voor de melkveesector, dat wil zeggen voor die melkveebedrijven die stallen hebben met een traditionele betonnen roostervloer en een mestkelder.

## 1.1 Principes en maatregelen – de longlist

Op basis van een literatuurscan en consultatie van experts werd in de eerste fase van het onderzoek een longlist gemaakt van beschikbare en in de nabije toekomst toepasbare maatregelen die de methaanuitstoot in de veehouderijsector (kunnen) reduceren. Zoals eerder vermeld, de focus hier ligt op technische maatregelen rondom mest.

De belangrijkste criteria voor het vaststellen of een maatregel als kansrijk gezien kan worden waren:

- De emissiereductiepotentie van de maatregel of combinatie van maatregelen – met name van methaan.
- Maatregelen die al in de praktijk worden geïmplementeerd of die vanaf 2021 praktijkrijp konden worden.
- Van groot belang is dat de technieken makkelijk zijn in te passen in de bedrijfsvoering en bedrijfseconomisch verantwoord (eventueel met subsidie) zijn toe te passen.

---

<sup>8</sup> <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2018/10/10/klimaatenvlop-225-miljoen-voor-circulaire-economie>. Dit project gaat ook door binnen vervolg Klimaatenvloppen.

- De combinatie van maatregelen moet het ook mogelijk maken om de ammoniakemissie onder 8,6 kg per dierplaats per jaar te krijgen. Met uitzondering van de provincie Noord-Brabant waar een strengere eis geldt:  $\text{NH}_3 \leq 7$  kg per dierplaats per jaar.
- De maatregelen hebben ook een positief/neutraal effect op de reductie van andere (BKG-)emissies.
- Deze maatregelen hebben geen negatieve effecten op koegezondheid en dierenwelzijn.

Er zijn ook maatregelen die de methaanproductie door pens-fermentatie (enterisch methaan) verminderen. Methaan wordt in de pens van herkauwers, zoals runderen, door micro-organismen gevormd. Voor dieren met één maag, zoals varkens, is mest de belangrijkste bron van  $\text{CH}_4$  met een omvang van rond 80-90%, 10-20% betreft enterisch methaan die gevormd wordt in de darmen (Groenestein et al., 2016; Šebek et al., 2016; Van Bruggen et al., 2021). De verhouding enterisch/mest hangt af van het gevoerde rantsoen, opslagduur van de mest, etc. 'Van de totale  $\text{CH}_4$ -emissies uit de landbouw is 83% rundvee gerelateerd, waarvan het overgrote deel (76%) enterisch methaan betreft' (Šebek et al., 2016). Methaanuitstoot na aanwending van de drijfmest wordt als verwaarloosbaar beschouwd (Sherlock et al., 2002; Sommer et al., 2004; Van Bruggen et al., 2021). Het is belangrijk om te bedenken dat 'bruto' gezien en vanuit het perspectief van de melkveehouderijsector de grootste methaanemissiereductie bij enterisch methaan te behalen is. Wel is mest het dier niet en kunnen technische oplossingen rond mest op korte termijn relatief simpeler geïmplementeerd worden, omdat er in dat geval minder dier-technisch en ethische bezwaren zijn (Puentes-Rodríguez & Groenestein, 2019).

Er bestaan een aantal principes en technische maatregelen om het proces van methaanvorming (methanogenese) in mest te kunnen remmen of te stoppen. Methanogenese in mest vindt plaats als organische stof afgebroken wordt onder anaerobe omstandigheden. Andere maatregelen zijn erop gericht om het reeds geproduceerde methaan (end-of-pipe) grotendeels te neutraliseren, door de gevormde  $\text{CH}_4$  te oxideren tot  $\text{CO}_2$ . Methaan is een ongeveer 25 keer sterker BKG dan koolstofdioxide. De uitstoot uit stallen en mestopslagen was in 2016 65,3 Kton ( $\text{CH}_4$ ), wat neerkomt op 1,83 Mton  $\text{CO}_2$ -eq (bron: Emissieregistratie). Emissie die volgens Vellinga en De Vries (2018) in theorie met 75% gereduceerd kan worden.

De tabel hieronder geeft een inventarisatie van kansrijke maatregelen om methaan te reduceren. Een aantal van deze principes en maatregelen worden verder uitgelegd, uitgewerkt en gecombineerd in andere hoofdstukken van het rapport. De tabel geeft de theoretische reductiepotentie en de literatuurbronnen aan.

**Tabel 3** Kansrijke maatregelen om methaanemissie te reduceren + hun reductiepotentie + de literatuurbronnen.

| <b>Maatregel</b>   | <b><math>\text{CH}_4</math> reductiepotentie</b>  | <b>Bronnen</b>  |
|--|---|---|
| <b>Mestmaatregelen - Frequent mest van de vloeren en uit mestkelders verwijderen</b> | 40 - 80% (mest)   | Groenestein et al., 2010; Massé et al., 2016; Šebek et al., 2016; Willegghems et al., 2016  |
| <b>Primaire scheiding toepassen en dikke fractie meteen drogen en korrelen</b>       |   |   |
| <b>Mestmaatregelen - Aanzuren, middelen aan mest toevoegen</b>                       | 65% à 85% (rundvee) (mest)<br><br>In de varkenshouderij: tussen de 50% en bijna 100% (mest) bereikt (met middelen als de commerciële chemische additieven NX23, Stalosan en Biosuper) | Petersen et al., 2012; Šebek et al., 2016 en referenties daarin; Martínez-Fernández et al., 2018; Puentes-Rodríguez et al., 2022 en referenties daarin<br><br>Petersen et al., 2014 |

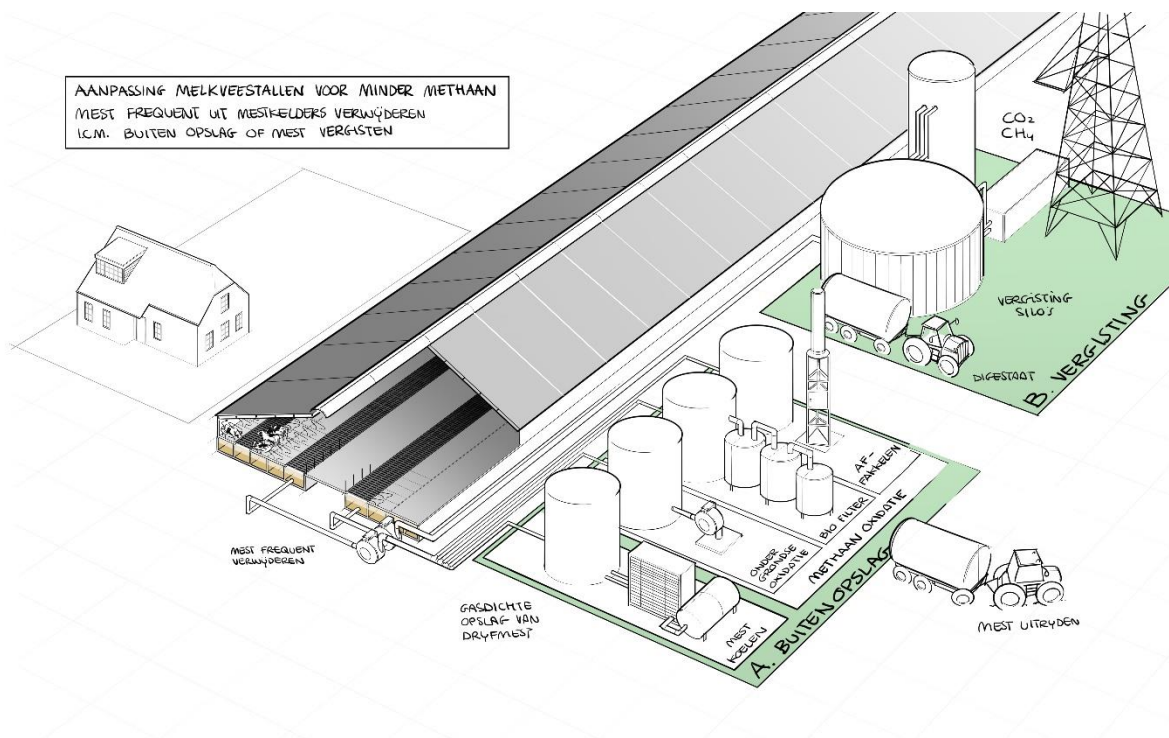
|   |  |  |  |
|---|--|--|--|
|   |  | Het aanzuren met zwavelzuur van varkensmest kan meer dan 90% (mest) methaanemissiereductie opleveren. Recent onderzoek met zwavelzuur (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) bevestigt een 69-84% methaanemissie reductie bij melkvee.<br>Organische zuren zijn ook kansrijk. | Habewold et al., 2018;<br>Fangueiro et al., 2015; Im et al., 2021; Puente-Rodríguez et al., 2022   |
| <b>Mestmaatregelen – Mixen en beluchten van mest</b>                                |  | 57% in melkveestallen (mest)   | Amon et al., 2006a; Šebek et al., 2016   |
|   |  | Bij varkens tussen 40% en 99% (mest)   | Martinez et al., 2003;<br>Thompson et al., 2004;<br>Martinez et al., 2009; Šebek et al., 2016; Calvet et al., 2017                                 |
| <b>Mestmaatregelen – Mest koelen</b>  |  | In varkensstallen op basis van een buitenlucht temperatuur van 10 °C = emissiereductie tussen 23 en 50% (mest)   | Borhan et al., 2012;<br>Groenestein et al., 2012; Šebek et al., 2016; Cárdenas et al., 2021; Im et al., 2020                                       |
| <b>Mestmaatregelen - Mestvergisting</b>   |  | 60 tot 80% (mest)  | Schils et al., 2016; GRA, 2013; CDM, 2015; De Vries et al., 2018; Groenestein et al., 2020   |
| <b>Mestmaatregelen – Methaanoxidatie</b>  | Methaanoxideren ondergronds                  | In zandige gronden is het mogelijk om gemiddeld 50-75 g methaan per m <sup>2</sup> per dag te oxideren. Een standaard varkensbedrijf in Nederland vereist enkele honderden m <sup>2</sup> om 70% (mest) van het geproduceerde methaan te verminderen.                    | Oonk et al., 2015  |
|   | Methaan uit de lucht halen (biofilter)       | 50% (mest)   | Melse et al., 2005   |
|   | Affakkelen van geproduceerde CH <sub>4</sub> | Door de combinatie van afdekken van de mestopslag en het affakkelen van methaan 62% (mest) reductie van broeikasgassen   | Wightman & Woodbury, 2016  |
| <b>Enterisch – Afzuiging en behandeling van uitgeademde lucht dicht bij de bron</b> |  | 40% (enterisch)  | Expert judgement 2019  |
| <b>Fokkerijmaatregelen (CH<sub>4</sub> direct)</b>                                  |  | 1% (enterisch) per jaar (12% in 2035)  | Expert judgement 2018, zie ook Bell et al., 2011; Manzanilla-Pech et al., 2016; Mirzaei-Aghsaghali & Maheri-Sis, 2016; Pinares-Patiño et al., 2011 |
| <b>Voermaatregelen – Rantsoensamenstelling en de kwaliteit van de voeding</b>       |  | Tussen 5% en 10% (enterisch)   | Expert judgement 2018, Šebek et al., 2016; Patra et al., 2017; Warner et al., 2017   |
| <b>Voermaatregelen – Inhibitors</b>   | 3-NOP (3-nitrooxypropanol)                   | Tussen 20% en 30% (enterisch)  | De Brugh, 2016; Hristov et al., 2015; Jayanegara et al., 2018; Lonch et al., 2017; Martinez-Fernandez et al., 2018                                 |
|   | Nitraat                                      | Tussen 15% en 30% (enterisch)  | De Brugh, 2016; Klop, 2016; Lonch et al., 2017; Troy et al., 2015  |

In dit project hebben we specifieke metingen en/of lab analyses uitgevoerd rondom de volgende combinaties van maatregelen:

- **Mest koelen:** Drijfmest in mestkelder koelen en regelmatig mixen ten behoeve van een homogene temperatuur. Mestkelder wel/niet isoleren. Warmte opslaan en elders benutten of desnoods actief lozen.
- **Mest gecontroleerd composteren:** Dagontmesting van drijfmest vanaf dichte vloeren, secundaire scheiding (met een vijzelpers) in dunne en dikke fractie en dikke fractie gecontroleerd composteren tot > 60% droge stof (DS). Dunne fractie apart opslaan.
- **Mest mixen met lucht:** Drijfmest in mestkelders mixen door middel van luchtmixsysteem (vereist aanvullende maatregel om ammoniak tegen te gaan).
- **Primaire scheiding + vaste mest:** Dagontmesting van primair gescheiden feces en urine vanaf dichte vloeren, en feces opslaan in de vorm van stapelbare vaste mest. Gier apart in afgesloten opslag.
- **Mest toevoegingsmiddelen:** De resultaten van dit traject worden hier niet gerapporteerd maar zijn te vinden in (Monteny & Keuskamp, 2022; Monteny et al., 2021).

Andere combinaties van maatregelen die hier in meer of mindere mate besproken worden zijn:

- **Dichte vloer of rubbermat over bestaande roostervloer i.c.m. mest koelen in externe mestopslag (+ mixen).**
- **Mest frequent uit mestkelder verwijderen i.c.m. vergisten (of buitenopslag/koeling).** Dagverse drijfmest uit kelder verwijderen (uitpompen) i.c.m. (mono)vergisten voor de productie van biogas.
- **Mest frequent van dichte vloeren verwijderen i.c.m. vergisten (of buitenopslag/koeling).** Dagverse drijfmest van dichte vloeren verwijderen i.c.m. (mono)vergisten voor de productie van biogas.
- **Aanzuren (bijvoorbeeld met een zwavelzuur installatie) van drijfmest** (Puentec-Rodríguez et al., 2022).
- **Dichte vloer of rubbermat over bestaande roostervloer i.c.m. gas afzuigen en methaanoxidatie** (affakkelen, biofilter of ondergronds) + dikke/dunne fractie etc.
- **Mest frequent uit mestkelder verwijderen i.c.m. drijfmest in gasdichte externe opslag + methaanoxidatie** (affakkelen, biofilter of ondergronds oxideren).
- **Plasma technologie.**



Een aantal van deze maatregelen hebben we hier niet getest omdat ze zich nog in de ontwikkelingsfase bevinden en dus niet praktijkrijp zijn. Denk bijvoorbeeld aan methaanoxidatie of aan plasma technologie. Andere maatregelen zoals mest aanzuren zijn al getest en praktijkrijp, maar lopen tegen een aantal barrières bij de implementatie aan. De kansen en belemmeringen van mest aanzuren worden elders behandeld (Puente-Rodríguez et al., 2022). Andere maatregelen zijn in het kader van dit project niet bemeten omdat deze al zijn gevalideerd, zoals mestvergisting. De volgende sectie gaat kort in op deze maatregel.

## 1.2 Monovergisting van mest

### 1.2.1 Principe & ervaringen

Bij vergisting zetten micro-organismen onder anaerobe omstandigheden de organische stof om in biogas (CO<sub>2</sub> 25-50% en CH<sub>4</sub> 50-75%).<sup>9</sup> Het methaan (+ CO<sub>2</sub> = biogas) kan vervolgens in een warmtekrachtkoppelingsinstallatie omgezet worden in elektriciteit en warmte of de kwaliteit van het biogas kan met een opwaarderingsinstallatie verhoogd worden tot aardgaskwaliteit. De klimaatwinst bij deze principes en technieken komt niet alleen door de reductie van de emissies uit mest, maar ook doordat deze bio-energie fossiele energie kan vervangen.



Groenestein et al. (2020, blz. 11) definiëren de volgende vier fasen van het vergistingsproces:

- Hydrolyse: in deze eerste fase worden complexe, onopgeloste organische stoffen omgezet naar eenvoudige, opgeloste organische stoffen.
- Verzuring (acidogenese): omzetting van eenvoudige, opgeloste organische stoffen naar vluchtige vetzuren en CO<sub>2</sub>.
- Azijnzuurvorming (acetogenese): omzetting van vluchtige vetzuren naar azijnzuur en waterstof.
- Methaanvorming (methanogenese): omzetting van azijnzuur, koolstofdioxide en waterstof in methaan.

Een aandachtspunt dat in de literatuur wordt genoemd is de lekkage van methaan. Er zijn verliezen van rond de 5-20% uit vergisters geconstateerd (Groenestein et al., 2020; Sommer et al., 2001). Bij oudere installaties is het risico op lekkages groter, en ontwerpen kunnen op dit punt verder worden geoptimaliseerd.

Amon et al. (2006b) rapporteerden een reductie van 95% van de broeikasgasemissie, ondanks een toename van de N<sub>2</sub>O emissie, door het toepassen van deze maatregel. Efficiënte biogas vergisters kunnen methaanemissies die anders in de mest geproduceerd zouden worden en vervliegen gedurende opslag in de stal of daarbuiten met 60 tot 80% verminderen (GRA, 2013). Monovergisten (mest vergisten zonder toevoegingen) en co-vergisten (vergisten van mest met toevoegingen van ander organisch materiaal) zijn twee varianten van mestvergisting. Monovergisten wordt gezien als een optie die op bedrijfsniveau onder een aantal voorwaarden geïmplementeerd kan worden.

### 1.2.2 Randvoorwaarden voor (mono)vergisting van mest op melkveebedrijven

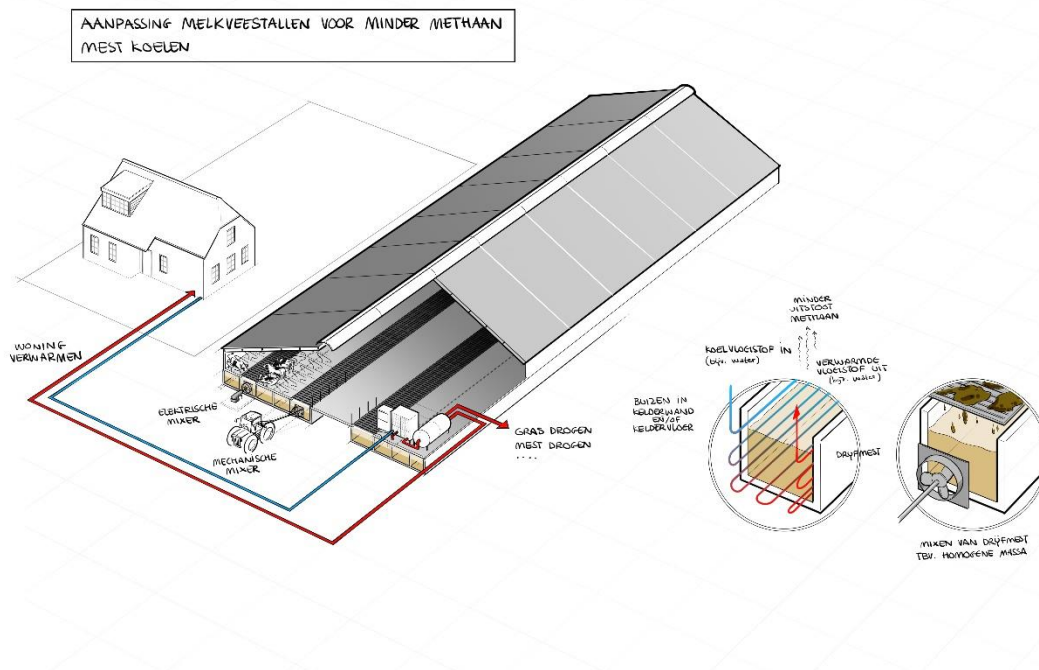
- Mest kan het beste zo snel mogelijk na excretie vergist worden. Dat is in de praktijk op dit moment vaak niet het geval. Mest zit vaak enige tijd in de mestkelder of in een buitenopslag voordat het de vergister in gaat. Het frequent verwijderen van mest uit de stal heeft op zichzelf al gunstige resultaten voor het reduceren van de methaanemissie in de stal. Ook omdat temperatuur in een buitenopslag gemiddeld genomen lager zal zijn.

<sup>9</sup> Er worden ook in kleine hoeveelheden waterstof, waterstofsulfide, lachgas en ammoniak geproduceerd (Groenestein et al., 2020).

- 
- De techniek vereist een goed procesmanagement. Bijvoorbeeld micro-organismen hebben een optimale temperatuur. Hiervoor is een vrij constante temperatuur belangrijk voor een optimaal verloop van het proces. Maar ook andere aspecten zoals pH, verontreinigingen en bepaalde stoffen kunnen het proces remmen. Groenestein et al. (2020, blz. 12) vermelden dat 'antibiotica, schoonmaak- en reinigingsmiddelen kunnen vanaf geringe hoeveelheden ook een remmende werking op het proces hebben.' Ook moeten veehouders rekening houden met verblijftijden i.r.t. de organisch stof die per tijdseenheid moet worden toegevoegd. Groenestein en collega's (ibid.) rapporteren dat een vuistregel voor de bovengrens van de organische-stofbelasting 4 à 5 kg OS/m<sup>3</sup> per dag is.
  - De huidige installaties zijn gevoelig voor storingen.
  - Het lekkagepercentage van de vergistingsinstallatie moet zo laag mogelijk zijn. Zie de discussie en referenties t.a.v. lekkages in Groenestein et al. (2020). Deze onderzoekers melden dat 'een reductie van het totale lekpercentage van 4% naar 2% volgens de berekeningen een CH<sub>4</sub>-emissiereductie van 29% tot gevolg zal hebben.' Maar ook andere objecten zoals de stal, tijdelijke opslag van drijfmest en van digestaat zijn gevoelig voor lekkages/emissies.
  - Met de huidige efficiëntie van de installaties t.a.v. biogas-opbrengst, investeringskosten en SDE++ subsidies wordt er ingeschat dat alleen monovergistingsinstallaties bij bedrijven met een veestapel boven de 270 melkkoeien rendabel kunnen worden gemaakt (persoonlijke communicatie, november 2019).

## 2 Mest koelen

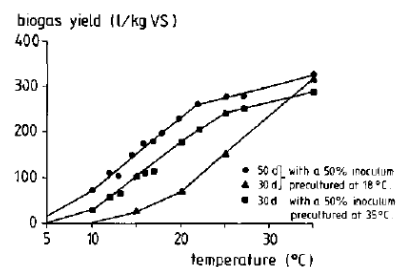
Daniel Puente-Rodríguez, Jan Vonk, A.P. (Bram) Bos & André J.A. Aarnink



### 2.1 Principe & ervaringen

Temperatuur is een belangrijke variabele die de productie van  $\text{CH}_4$  beïnvloedt (Groenestein et al., 2012). Dit principe is welbekend bij vergisting. De methanogene micro-organismen die verantwoordelijk zijn voor de afbraak van organische stof zijn al actief bij temperaturen rond de  $15\text{ }^\circ\text{C}$  (Zeeman, 1991) maar in vergisters worden hogere temperaturen gebruikt van rond de  $35\text{ }^\circ\text{C}$ , zodat het proces sneller verloopt (Jiang et al., 2021).

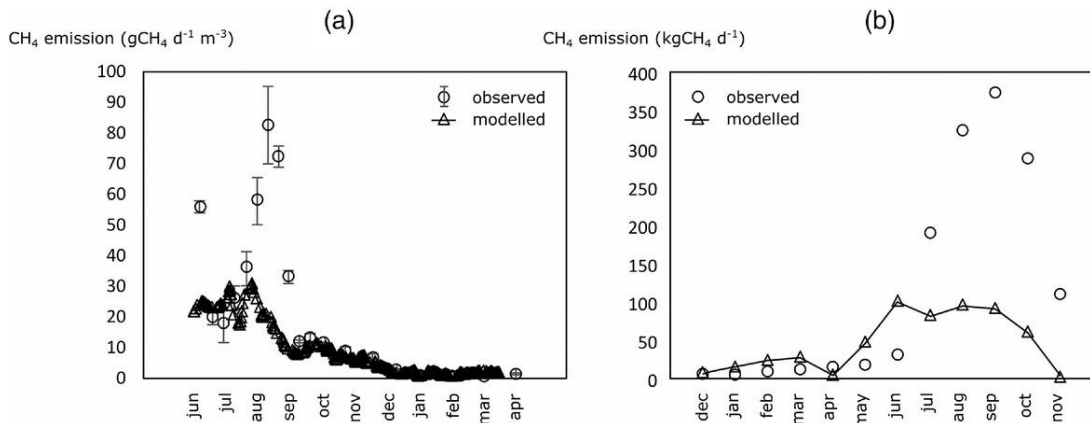
Volgens de regels moeten melkveebedrijven in Nederland minimaal 7 maanden mest kunnen opslaan (behalve als ze het restant afvoeren). Tijdens de toegestane uitrijperiode worden de mestkelders geleegd, en blijft er een laag oude mest achter, het inoculum. Deze laag vormt het actieve organische materiaal van waaruit micro-organismen de verse mest bereiken en inoculeren. Zeeman (1991) bepaalde het verband tussen mesttemperatuur en  $\text{CH}_4$ -productie voor de Nederlandse context. Ze modelleerde vervolgens de relatie tussen de hoeveelheid verse mest, de hoeveelheid inoculum en temperatuur (Zeeman, 1994). Ze rapporteerde dat met een inoculum van 50% bij temperaturen onder de  $10\text{ }^\circ\text{C}$  de uitstoot van  $\text{CH}_4$  zou kunnen worden geremd (Zeeman, 1991) (zie Figuur 3). Overigens detecteren andere auteurs bij deze temperatuur nog steeds  $\text{CH}_4$ -emissie uit mest (Massé et al., 2008).



**Figuur 3** Effect van temperatuur op biogasproductie (Zeeman, 1991)



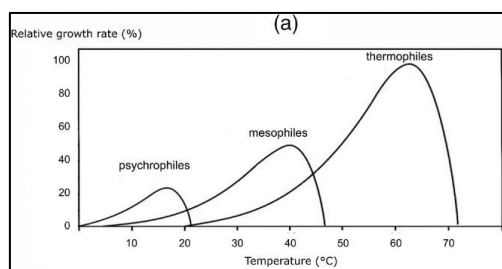
Dat methaanproductie toeneemt met een stijging van de temperatuur is goed bekend (zie Figuur 4). Kennis over temperatuur en methaanproductie is vooral tot stand gekomen in het kader van anaerobe vergisting, gericht op het stimuleren van de biogasproductie (Amon et al., 2006a; Amon et al., 2006b; Chadwick et al., 2011; De Vries et al., 2012; Jiang et al., 2021; McVoitte & Clark, 2019; Rodhe et al., 2015). Dalby et al. (2021) rapporteerden echter dat modellen die gebruikt worden om de temperatuurrepons van methaanemissie een onvolledige inschatting maken (zie Figuur 4).



**Figuur 4** (a) CH<sub>4</sub>-emissies waargenomen tijdens opslag van runderdrijfmest op pilotschaal in Denemarken van juni 2014 tot april 2015 (Baral et al. 2018) en (b) berekende (USEPA-model, een vereenvoudigd Van 't Hoff-Arrhenius-model) en waargenomen CH<sub>4</sub>-emissies van vloeibare mest die van december tot november in Canada werd opgeslagen (Baldé et al., 2016). In Dalby et al. 2021.

Dalby et al. (2021) ontwikkelden, in een reviewstudie, de thema's die aan de orde moeten komen om modellen te ontwikkelen voor het berekenen van de methaanemissie uit drijfmest. Een belangrijk thema is de microbiële respons op variaties in mesttemperatuur.

Onderzoek en praktijk bij anaerobe vergisting focust meestal op microbiële groepen met verschillende temperatuuroptima: psychrofiel (5-20 °C), mesofiel (25-40 °C) en thermofiel (boven 45 °C). Kennis rondom vergisting kijkt vooral naar mesofiele en thermofiele condities (zie Figuur 5). Als de temperatuur verandert dan verandert de type methanogenen. Daarom is het ook belangrijk om na een temperatuurverandering, naar de verandering in methanogenen en naar de methanogene activiteit op de korte en lange termijn te kijken (Dalby et al., 2018).



**Figuur 5** Indeling van methanogene soorten en hun respectieve groeisnelheid. Zie Dalby et al, (2021) voor referenties en uitleg.

Er is weinig informatie beschikbaar over de psychrofiële temperaturen waar drijfmest meestal bij wordt opgeslagen. Op basis van de literatuur en expert judgement durven Dalby et al. (2018) in te schatten dat zeer waarschijnlijk de verschuivingen in type methanogenen tussen psychrofiële naar mesofiele condities door vergelijkbare mechanismen als die bij hogere temperaturen zullen plaatsvinden en dat microbiële populaties met verschillende temperatuuroptima altijd aanwezig zijn, maar in overvloed veranderen als reactie op een langdurige temperatuurverandering. In de melkveehouderij is weinig onderzoek gedaan naar het verlagen van de temperatuur van mest als strategie om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen. Safleyu en Westerman (1994) zagen een lineaire daling van de methaanemissie van varkens- en rundveemest bij een temperatuuurdaling van 25 naar 10 °C. Im et al. (2020) rapporteren een CH<sub>4</sub>-emissiereductie van 50% door verlaging van de temperatuur van 35 naar 20 °C voor vaste mest;

d.w.z. rundermest gemengd met strooisel (zie voor andere schattingen Baldé et al., 2016; Elsgaard et al., 2016; Sommer et al., 2004). Cárdenas et al. (2021) stelden in een experimentele opstelling met drijfmest gevulde vaten vast dat tijdens zomer- en winteropslagperiodes, lage (winter)temperaturen consequent lagere niveaus van CH<sub>4</sub>-productie lieten zien (met een drempel van circa 14 °C).

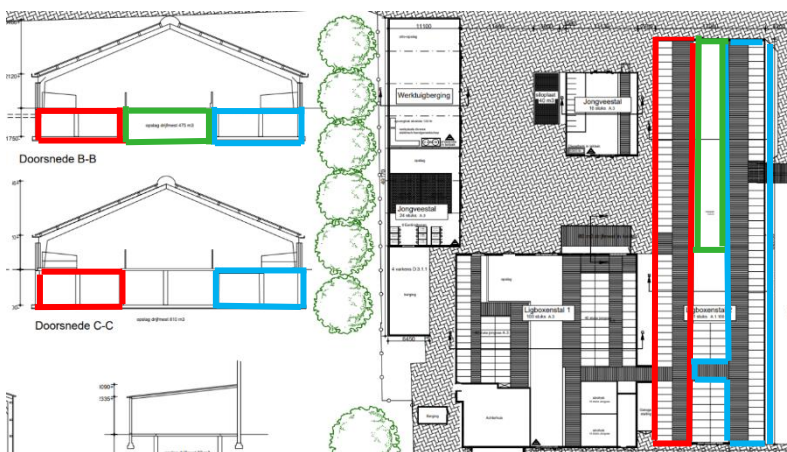
Dit hoofdstuk rapporteert de resultaten van een experiment onder praktijkomstandigheden waarbij een koelsysteem is geïnstalleerd om de temperatuur van drijfmest in de kelder te verlagen en het effect op de uitstoot van CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, en ammoniak (NH<sub>3</sub>) te bemeten. Ammoniakemissie is ook een duurzaamheidsuitdaging (met betrekking tot vermisting en verzuring, en daarmee de vermindering van biodiversiteit) voor de melkveesector en een lagere temperatuur in de mest kan ook bijdragen aan de vermindering daarvan (Aarnink & Elzing, 1998; Groot Koerkamp et al., 1998; Gustafsson et al., 2005; Wu et al., 2019).

## 2.2 Methodologische aanpak

In 2018-19 is op twee melkveebedrijven in de provincie Groningen een mestkoelingsinstallatie geplaatst. De twee melkveehouders (Zandhoeve Holsteins in Hellum en Melkveehouderij Ballingheim VOF in Holwierde) ontwierpen het systeem in samenwerking met een groep bedrijven (L'orèl Consultancy, Geothermica, en Agri-Comfort) en het initiatief is ondersteund door een subsidie van de provincie. Beide melkveehouders hadden al een systeem om de warmte uit het melkkoelingsproces te gebruiken voor verwarming van hun bedrijfswoning. Dat was voor dit doel niet genoeg en dus gingen ze op zoek naar extra warmtebronnen. Bij de verdere ontwikkeling van het systeem speelde ook het theoretisch positieve effect van het koelen van mest op de emissies een rol. Het onderzoeksinstituut Wageningen Livestock Research (WLR) coördineerde, faciliteerde en voerde sinds de winter van 2019 emissiemetingen uit.

### 2.2.1 Melkveebedrijven

Melkveebedrijf 1 (B1) (Zandhoeve Holsteins in Hellum) beschikt over een natuurlijk geventileerde ligboxenstal (1.052 m<sup>2</sup>) voor de melkkoeien. In deze stal staan twee rijen ligboxen met koematrassen. Het familiebedrijf heeft nog andere gebouwen voor bijvoorbeeld droge koeien. De bedrijfswoning bevindt zich ook op het bedrijfsterrein. De Holstein-Friesian melkveestapel bestond uit melkkoeien (circa 125 waarvan ≈ 23 vaarzen en ≈ 15 droge koeien) en kalveren (≈ 70) tijdens het experiment. De melkkoeien wogen circa 675 kg (levend gewicht, gebaseerd op inschattingen van de melkveehouder).



**Figuur 6** Doorsnedes B-B en C-C (links) van de stal waar het onderzoek werd uitgevoerd. In de tekening van deze stal (rechts) en bij de doorsnedes, in rood, de referentie mestkelder en in blauw de gekoelde mestkelder. Groen, niet gekoelde en niet bestudeerde tussenmestkelder.

De bedrijfsgemiddelde melkproductie was 9.000 kg per koe per jaar (4,23% vet en 3,49% eiwit). Het totale mengrantsoen is samengesteld uit ingekuuld gras (60%), maïs (20%) en een krachtvoersupplement – 20% enkelvoudige grondstoffen d.w.z., 960 Voeding Eenheid Melk (VEM) en 160 Ruw Eiwit (RE). De melkkoeien kregen vanaf half maart tot begin oktober dag en nacht weidegang. De rest van de tijd stonden ze op stal. Het bedrijf heeft 70 ha grasland en 14 ha voor de productie van maïs.

De melkkoeienstal, waar het onderzoek is uitgevoerd, heeft traditionele betonnen roostervloeren met mestschuiven en ondergelegen mestkelders voor de opslag van drijfmest. In deze stal zijn twee mestkelders. Om het effect van koelen te kunnen vaststellen werd voor dit onderzoek een kelder uitgerust met een koelinstallatie en fungeerde de andere - niet gekoelde - kelder als referentie. De gekoelde mestkelder ('case') is 64 m lang, 4,65 breed, heeft een oppervlak van circa 298 m<sup>2</sup> en is 1,5 tot 2 m diep. De niet gekoelde mestkelder ('control') is eveneens 64 m lang, 4,65 breed en 1,5 tot 2 m diep. De keldermuren waren niet geïsoleerd. Met ondersteuning van de melkveehouder is er geprobeerd om de volumens aan mest in beide kelders gelijk te houden. Er waren twee hoog liggende schotten (0,8 m hoog, 2 m breed) tussen case en control kelders en de niet gekoelde tussen-mestkelder (zie Foto 1) waarlangs tijdens het mixen mest van een naar de andere kelder zou kunnen zijn overgestroomd. De opslagcapaciteit van deze mestkelders voor de huidige veestapel is 5 maanden. De mest wordt gemengd met elektrische mixers. Meestal wordt in dit soort stallen ergens tussen één keer per week of één keer per maand (rond 1-2 uur per keer) mest gemixt om het te homogeniseren en de verpompaarheid te vergemakkelijken. In dit geval heeft 'mest mixen' ook de functie in het koelsysteem om een homogene temperatuur van de mestmassa te bereiken. Daarom werden de mixers tijdens dit onderzoek drie keer per dag gedurende 10 minuten geactiveerd.



**Foto 1** Schot tussen gekoelde en niet gekoelde tussen-mestkelders.



**Foto 2** Impressie van het geïnstalleerde leidingsysteem op B1.

Het koelsysteem in deze stal bestond uit een leidingsysteem (200 m) gevormd door buizen (Powerwave, PE100RC, met een diameter van 63 mm) bevestigd aan een verzaamd metalen frame en liggend op de bodem van de mestkelder. Door de buizen stroomde water (75%) en glycol (25%) die warmte aan de mest onttrekt. Koeien scheiden urine/feces uit op een temperatuur van ca. 38,5 °C. De temperatuur van de mest in de kelder fluctueert samen met de seizoenstemperatuur. We schatten in dat de gemiddelde jaartemperatuur van drijfmest in de mestkelders van melkveestallen circa 15 °C is. Een elektrische warmtepomp (Wolf warmtepomp met 16 kW verwarmingsvermogen) bracht de warmte van de mest naar de bedrijfswoning. Het systeem produceerde echter zoveel warmte dat een overschot wordt afgegeven aan de open lucht (zie discussie hieronder).

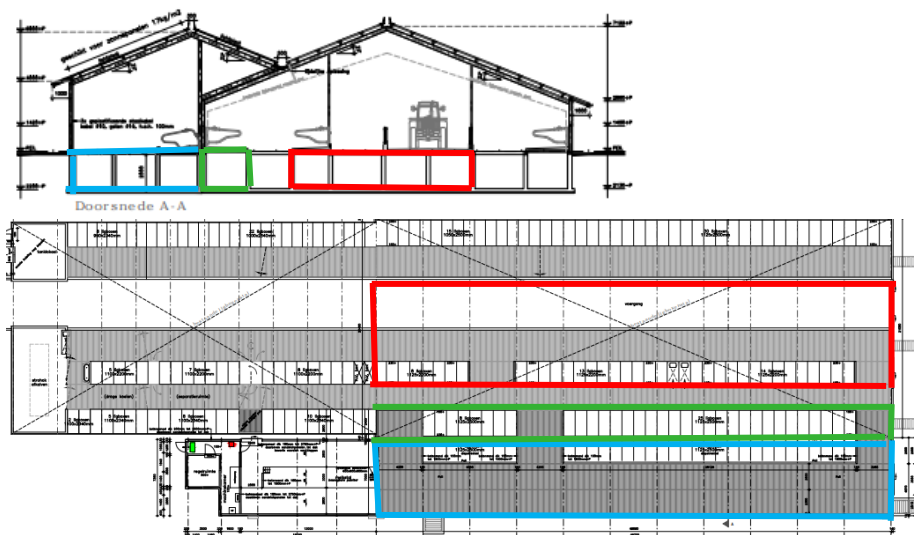
Melkveebedrijf 2 (B2) (Melkveehouderij Ballingheim VOF in Holwierde) heeft ook een natuurlijk geventileerde ligboxenstal. De stal bevat een enkele en dubbele rij ligboxen, die ingestrooid worden met een zogenoemde 'green bedding' (secundair gescheiden dikke mestfractie). In deze stal is ook ruimte aanwezig voor droge koeien en afkalfruintes, voor de melkstal etc. Ook dit is een familiebedrijf en de stal en overige panden bevinden zich op het terrein van het bedrijf. De Holstein-Friesian melkveestapel tijdens het onderzoek werd gevormd door melkgevende koeien (ca. 145), pinken (≈ 23), droogstaande koeien (≈ 14) en kalveren (≈ 22).

De melkkoeien wogen 650 à 700 kg (levend gewicht, gebaseerd op inschattingen van de melkveehouder). De bedrijfsgemiddelde melkproductie was 8.620 kg per koe per jaar. Het rantsoen was als volgt samengesteld:

- 's zomers vers gras, 4 kg bierbostel/koe, 5 kg snijmais/koe, 0,5 kg stro/koe en krachtvoer afhankelijk van de dagproductie
- 's winters kuilgras, 4 kg bierbostel/koe, 5 kg snijmais/koe, 0,5 kg stro/koe en krachtvoer afhankelijk van de dagproductie

De melkkoeien hadden toegang tot weidegang gedurende 185 dagen per jaar, totaal 1.700 uur. De rest van de tijd stonden ze binnen. Het bedrijf heeft 63 ha grond (grasland en akkerbouw).

De melkveestal waar het onderzoek is uitgevoerd is in het referentie gedeelte voorzien van een traditionele betonnen roostervloer met mestschuif. Een nieuwgebouwd deel van de stal (5 x 52 m) was voorzien van een (ammoniak)emissiearm vloersysteem dat rubber en beton combineert met flexibele kleppen onder de rubberen inzetstukken om de kelderemissie te beperken (Rav-code A 1.13). Dit gedeelte wordt gekoeld (case), waarbij het leidingsysteem (400 m) in het beton van de kelderbodem gestort is. De gekoelde kelder heeft geïsoleerde vloer en wanden, waardoor de invloed van de temperatuur van de bodem en het grondwater op de mesttemperatuur kan worden verminderd.



**Figuur 7** Doorsnee (boven) en plattegrond (onder) van de stal met in het blauw de gangen in de mestkelder waar het mestkoelingssysteem ligt. In het groene gedeelte ligt geen koelsysteem, maar de mest zit wel in het mestcircuit van het gekoelde gedeelte. In rood de mestgangen van de referentie mestkelder.

De andere elementen van het koelsysteem zijn vergelijkbaar met die van B1. Het oppervlak van de vloer boven de gekoelde kelder is (10 x 52) 520 m<sup>2</sup>. De totale opslagcapaciteit van de stal is 3.300 m<sup>3</sup> mest wat voor de huidige veestapel een opslagcapaciteit van 7 maanden betekent. Bij de start van de metingen, in maart 2020, werd er een trekker gebruikt voor het mixen van de mest. Dit werd een keer per week gedaan. Na twee emissie- en temperatuurmetingen werd de meetreeks stopgezet omdat het mixen onvoldoende bleek voor het koelen van de drijfmest. De metingen werden vanaf september hervat nadat elektrische mixers geïnstalleerd waren.

Vanuit een methodologisch perspectief is de experimentopstelling niet optimaal vanwege de vele verschillen tussen de case en control mestkelders, zeker in het geval van B2. Het betrof echter de twee pionierende melkveebedrijven die met het koelen van mest waren begonnen. Om die reden is toch gekozen om door te gaan met de metingen.

## 2.3 Broeikasgas- en ammoniakemissiemetingen

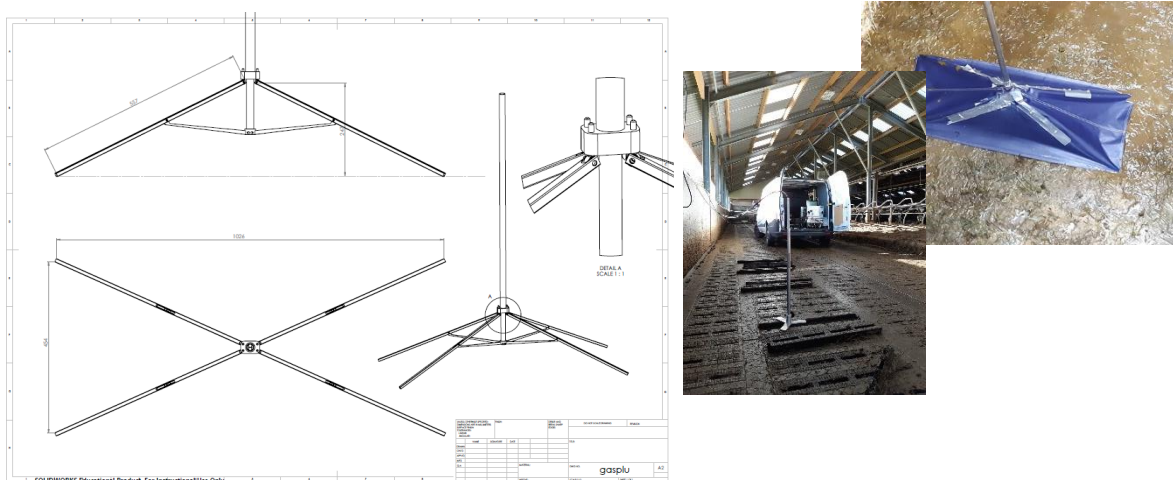
Op deze twee melkveebedrijven was het mogelijk om een case-control onderzoek te organiseren. In beide stallen werd de mest in één kelderdeel gekoeld en die in een ander kelderdeel niet. Case-control-onderzoeken zijn van cruciaal belang bij het meten van broeikasgassen in de melkveehouderij, aangezien er nog geen goede referentiewaarden beschikbaar zijn. De case en de control mestkelders zijn gescheiden van elkaar door betonnen wanden. Bovendien worden vergelijkbare koeien met hetzelfde voerregime op de roostervloer gehuisvest. De mestniveaus en de leeftijd van mest tussen case en control waren voor en tijdens het experiment dan ook vergelijkbaar. Verder is er 6 keer per jaar gemeten om eventuele seizoensinvloeden mee te nemen in het onderzoek.

De oorspronkelijk doelstelling was om een mesttemperatuur van 4 °C in B1 en 10 °C in B2 te bereiken. Betrokken stakeholders wilden bij B1 de grenzen van koeling verkennen. Deze temperaturen werden echter nooit bereikt gedurende de tijdspanne van dit onderzoek (Tabel 4). De temperatuur werd gemeten op verschillende plaatsen in de case en control mestkelders. Dit gebeurde aan het oppervlak en vervolgens om de 40 cm totdat de bodem bereikt werd.

Tijdens de meetdagen werden mestmonsters verzameld uit de case en control kelder. In het laboratorium van WLR zijn de volgende parameters geanalyseerd: totaal stikstof (N), ammonium-N ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), totaal fosfor (P), kalium (K), droge stof en as (Zie Bijlage 1). Ook werden de mestniveaus geregistreerd.

De emissies van de broeikasgassen methaan en lachgas uit de mest werden gemeten en ook de uitstoot van ammoniak. In plaats van de uitstoot van de hele stal te meten, zijn er metingen gedaan aan het mestoppervlak van de gekoelde en niet-gekoelde mestkelders. Op deze manier kon het directe effect van koelen op de emissies uit de opgeslagen mest vastgesteld worden. En werden bijvoorbeeld enterisch methaan of de ammoniakemissie van het vloeroppervlak uitgesloten.

Het probleem van het gebruik van fluxkamers voor het meten van emissies onder de stalvloer is dat zware betonnen vloerelementen gedemonteerd (en soms zelfs losgezaagd) moeten worden. Voor het uitvoeren van deze metingen is een nieuwe methodiek getest, gebaseerd op de statische (gesloten) fluxkamer methode met een 'meetparaplu' (Figuur 8). Als de paraplu is gesloten, past deze door de spleten van de roostervloer. Inmiddels zijn er verschillende modellen gemaakt die langs spleten met breedtes tot 10 mm kunnen. Dit paraplu-achtige systeem wordt onder de roostervloer geopend om vervolgens op het mestoppervlak te worden geplaatst. Om deze te kunnen gebruiken mogen kelders niet volledig zijn gevuld met mest, een ruimte van ca. 35-60 cm is nodig om het apparaat te kunnen openen.



**Figuur 8** Impressies van het ontwerp (links, bron: Technical Development Studio – WUR) en het gebruik van de meetparaplu (rechts).

---

Per melkveebedrijf zijn metingen uitgevoerd op 6 plaatsen per mestkelder (case en control). Op bedrijf B2 werd de meetreeks onderbroken en vervolgens herstart, omwille van het installeren van elektrische mixers.

De concentratie is op de bedrijven gemeten met een 'Fourier-transform infraroodspectroscopie' (FTIR) monitor (type DX-4000; Gasmeter Technologies Oy, Helsinki Finland). Data werd geanalyseerd met de bij de FTIR horende applicatie Calcmet (versie 12.202). In de software worden zo nodig compensaties uitgevoerd voor andere componenten dan de te analyseren gassen. Naast water (standaard) werd in de analyse gecompenseerd voor de belangrijkste niet-methaan vluchtige organische stoffen (propaan-1-ol, ethylacetaat, isopropanol, acetaldehyde en n-propylacetaat), ethanol en vluchtige vetzuren (azijnzuur en boterzuur). Het resultaat daarvan is een outputfile met de concentraties per tijdvak van 20 seconden. Begin en eind van een meting werden uit de aantekeningen gedurende meetdagen gehaald, en geverifieerd door de data te plotten. Daarmee was ook een visuele inspectie van de data mogelijk bijvoorbeeld om te bepalen of er reden is te veronderstellen dat de paraplu niet goed geplaatst was en er daardoor mogelijk uitwisseling met de lucht in de kelder was.

De emissie bij de statische meetmethode wordt bepaald uit de toename van de concentratie en de inhoud van de meetruimte. Voor methaan en lachgas werd daarvoor de waarde een minuut na het begin van de meting afgetrokken van de waarde een minuut voor het einde ervan. Omdat de emissie van ammoniak al snel nadat de paraplu is geplaatst afneemt doordat de lucht verzadigd raakt, werd hier visueel de periode waarin emissiesnelheid stabiel was vastgesteld. Vervolgens werd de emissie uitgedrukt in mg/m<sup>2</sup>/u volgens:

$$(\text{Concentratie eind} - \text{concentratie begin}) / \text{meetduur in seconden} \times 3600 \times \text{conversiefactor ppm naar mg} \times (0,032/0,4308)$$

Waarin 3600 het aantal seconden in een uur is, en 0,032 en 0,4308 respectievelijk inhoud en oppervlakte van de paraplu. Verder staat 1 ppm van de stof gelijk aan 0,67 mg CH<sub>4</sub>, 0,71 mg NH<sub>3</sub> of 1,83 mg N<sub>2</sub>O.

Hoewel met de FTIR-techniek op deze wijze (fundamenteel) onderzoek naar emissiepatronen van verschillende gassen en componenten die hierbij een rol spelen mogelijk is, zijn in deze verkennende studie behalve CH<sub>4</sub> alleen NH<sub>3</sub> en N<sub>2</sub>O betrokken. Bij de beoordeling van stijglijnen werd mede gekeken naar CO<sub>2</sub>, maar dit gas wordt hier niet gerapporteerd omdat het deel uitmaakt van de zogenaamde korte kringloop.

Als gevolg van de hoge concentraties die onder de paraplu waargenomen werden, moest het meetbereik van de FTIR-monitor uitgebreid worden. Daarbij bleek het ook noodzakelijk voor meer en andere componenten te gaan compenseren. Tezamen met software-upgrades en onderhoudsbeurten hebben deze problemen tot een vertraging in het rapporteren van de resultaten en publicatie van dit rapport geleid.

## 2.4 Resultaten

Op beide bedrijven is op de meetdagen een temperatuurprofiel gemaakt, door op verschillende plekken in de stal in stappen van 40 cm diepte de mesttemperatuur te meten. De resultaten zijn samengevat in onderstaande Tabel 4.

**Tabel 4** Samenvatting van gemiddelde mesttemperaturen (°C) tijdens de meetdagen op bedrijf B1 (afgezonken mestkoelsysteem) en B2 (ingestorte buizen in keldervloer). Met een kleurschaal, per bedrijf van blauw (koudst) naar rood (warmst) wordt het temperatuurverschil van de opgeslagen mest weergegeven. Gemiddelde waarden worden in groen weergegeven.

|             | Gekoeld     |             |             |            |            |             | Gem.        | Referentie  |             |             |             |             |             | Gem.        |
|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|             | Oppervlak   | -40cm       | -80cm       | -120cm     | -160cm     | Bodem       |             | Oppervlak   | -40cm       | -80cm       | -120cm      | -160cm      | Bodem       |             |
| <b>B1</b>   |             |             |             |            |            |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
| 15-01-2020  | 10,6        | 10,3        | 10,6        |            |            | 8,7         | 10,1        | 12,4        | 12,4        | 12,4        |             |             | 12,5        | 12,4        |
| 04-03-2020  | 10,0        | 9,9         | 9,6         |            |            | 9,0         | 9,6         | 11,4        | 11,5        | 11,5        |             |             | 11,6        | 11,5        |
| 19-05-2020  | 12,6        | 11,1        | 10,6        |            |            | 9,4         | 10,9        | 12,7        | 12,0        | 12,0        |             |             | 12,0        | 12,2        |
| 21-07-2020  | 11,9        |             |             |            |            | 11,2        | 11,5        | 15,4        |             |             |             |             | 14,7        | 15,0        |
| 16-09-2020  | 15,9        | 17,1        |             |            |            | 11,6        | 14,9        | 18,1        | 17,8        |             |             |             | 16,9        | 17,6        |
| 03-11-2020  | 13,3        | 13,4        | 13,7        |            |            | 10,8        | 12,8        | 15,4        | 15,5        | 15,8        |             |             | 15,2        | 15,5        |
| <b>Gem.</b> | <b>12,4</b> | <b>12,4</b> | <b>11,1</b> |            |            | <b>10,1</b> | <b>11,5</b> | <b>14,2</b> | <b>13,8</b> | <b>12,9</b> |             |             | <b>13,8</b> | <b>13,8</b> |
| <b>B2</b>   |             |             |             |            |            |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
| 08-01-2020  |             | 9,7         | 9,1         | 9,2        | 9,2        | 9,1         | 9,2         |             | 10,6        | 10,3        | 10,8        | 11,0        | 11,0        | 10,7        |
| 12-02-2020  |             | 8,2         | 9,9         | 9,9        | 9,3        | 8,4         | 9,1         |             | 7,0         | 8,6         | 10,6        | 10,6        | 10,4        | 9,4         |
| 11-03-2020  | 10,8        | 9,9         | 9,8         | 9,6        | 8,2        | 6,2         | 9,1         | 11,5        | 11,0        | 10,9        | 10,8        | 10,8        | 11,1        | 11,0        |
| 20-05-2020  | 12,9        | 11,1        | 10,0        |            |            | 7,4         | 10,4        | 13,4        | 12,1        | 11,9        |             |             | 11,9        | 12,3        |
| 04-08-2020  | 15,7        | 15,3        |             |            |            | 13,0        | 14,7        | 17,2        |             |             |             |             | 17,2        | 17,2        |
| 17-09-2020  | 15,2        |             |             |            |            | 11,8        | 13,5        | 16,2        | 16,6        |             |             |             | 16,7        | 16,5        |
| 04-11-2020  | 11,9        | 12,5        | 12,7        |            |            | 11,4        | 12,1        | 12,9        | 14,6        |             |             |             | 14,6        | 14,1        |
| 27-01-2021  | 5,9         | 7,3         | 7,7         | 7,8        |            | 6,1         | 7,0         | 7,0         | 8,3         | 8,9         | 9,1         |             | 9,6         | 8,6         |
| 17-03-2021  | 7,1         | 7,3         | 6,9         |            |            | 5,5         | 6,7         | 8,2         | 9,1         | 9,8         |             |             | 9,8         | 9,2         |
| 23-06-2021  | 14,8        |             |             |            |            | 11,1        | 13,0        | 15,5        | 15,8        |             |             |             | 14,3        | 15,2        |
| <b>Gem.</b> | <b>11,8</b> | <b>10,2</b> | <b>9,4</b>  | <b>9,1</b> | <b>8,9</b> | <b>9,0</b>  | <b>9,9</b>  | <b>12,7</b> | <b>11,7</b> | <b>10,0</b> | <b>10,3</b> | <b>10,8</b> | <b>12,7</b> | <b>11,7</b> |

De oorspronkelijk beoogde mesttemperatuur werd op locatie B1 niet behaald (11,5 °C, doel 4 °C), op locatie B2 werd deze gemiddeld wel behaald (9,9 °C, doel 10 °C). In de zomer lagen de temperaturen echter boven het doel. Beide uitvoeringen presteerden vergelijkbaar qua koelresultaat, met temperaturen die voor de case gemiddeld rond de 2-2,5 °C lager liggen. Hierbij speelt een rol dat B1 een groter koelvermogen had en bij B2 de kelder geïsoleerd was.

Resultaten van de paraplumetingen zijn cijfermatig samengevat in Tabel 5 en visueel in Figuur 9 en Figuur 10. Deze zogeheten boxplots geven een idee van de variatie en verschillen tussen meetdagen en behandelingen.

**Tabel 5** Samenvatting van emissies (medianen in mg/m<sup>2</sup>/u) uit mest en het verschil (%) tussen control (niet gekoeld) en case (koeling) voor CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub> en N<sub>2</sub>O.

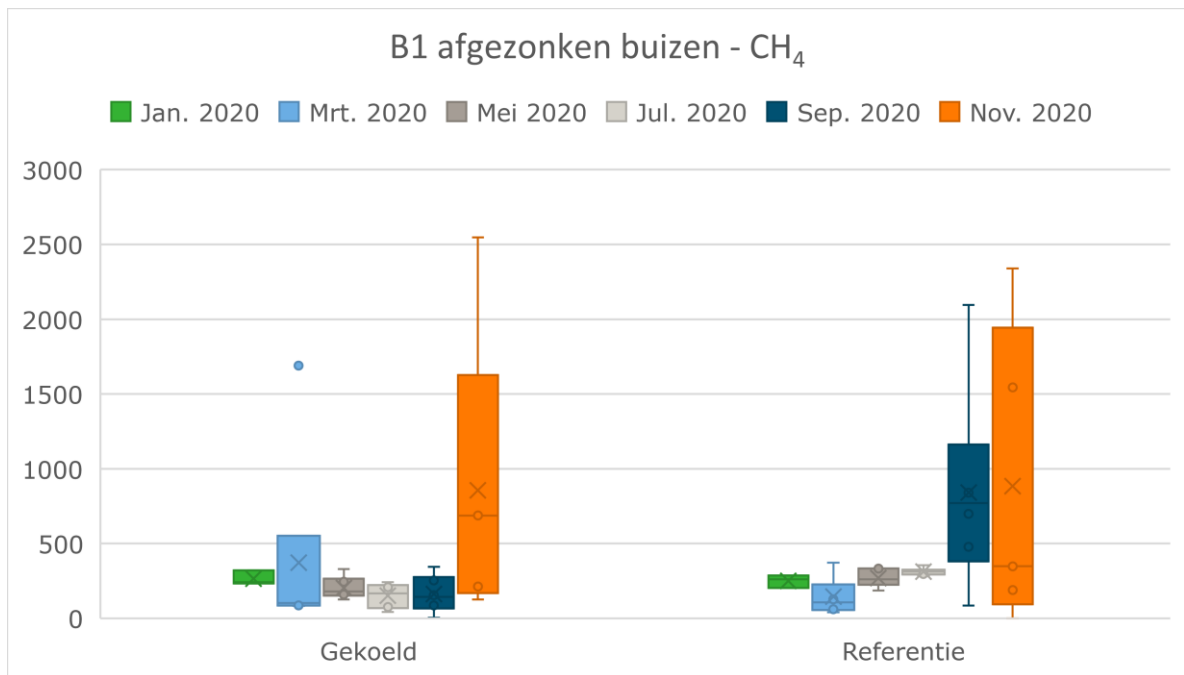
| Datum                    | CH <sub>4</sub> control<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | CH <sub>4</sub> case<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | Vershil<br>CH <sub>4</sub> (%) | NH <sub>3</sub> control<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | NH <sub>3</sub> case<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | Vershil<br>NH <sub>3</sub> (%) | N <sub>2</sub> O control<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | N <sub>2</sub> O case<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | Vershil N <sub>2</sub> O (%) |
|--------------------------|---|--|--------------------------------|---|--|--------------------------------|--|---|------------------------------|
| <b>Melkveebedrijf B1</b> |   |  |                                |   |  |                                |  |   |                              |
| 15-01-2020               | 175   | 161  | -8                             | 25,2  | 42,1   | 67                             | 0,06   | n.d.  | -                            |
| 04-03-2020               | 72  | 69   | -5                             | 6,7   | 13,8   | 107                            | 0,04   | 0,00  | -94                          |
| 19-05-2020               | 175   | 120  | -31                            | 0,4   | 1,4  | 245                            | a)   | a)  | a)                           |
| 21-07-2020               | 312   | 167  | -46                            | 15,2  | 17,1   | 12                             | 0,04   | 0,08  | 120                          |
| 16-09-2020               | 769   | 143  | -81                            | 25,9  | 55,1   | 113                            | 0,06   | 0,13  | 127                          |
| 03-11-2020               | 947   | 687  | -27                            | 4,0   | 5,7  | 41                             | 0,02   | 0,02  | -19                          |
| <b>Gem.<br/>± SD</b>     | <b>408 ± 361</b>                                  | <b>225 ± 229</b>                               | <b>-45**</b>                   | <b>12,9 ±<br/>10,9</b>                            | <b>22,5 ±<br/>21,4</b>                         | <b>75*</b>                     | <b>0,04 ±<br/>0,01</b>                             | <b>0,06 ±<br/>0,06</b>                          | <b>46</b>                    |
| <b>Melkveebedrijf B2</b> |   |  |                                |   |  |                                |  |   |                              |
| Datum                    | CH <sub>4</sub> control<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | CH <sub>4</sub> case<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | Vershil<br>CH <sub>4</sub> (%) | NH <sub>3</sub> control<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | NH <sub>3</sub> case<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | Vershil<br>NH <sub>3</sub> (%) | N <sub>2</sub> O control<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | N <sub>2</sub> O case<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | Vershil N <sub>2</sub> O (%) |
| 08-01-2020               | n.b.  | 156  | n.b.                           | n.b.  | 54,5   | n.b.                           | n.b.   | 1,86  | n.b.                         |
| 11-03-2020               | 53  | 71   | 33                             | 25,8  | 17,2   | -64                            | 0,01   | 0,00  | -57                          |
| 20-05-2020               | 145   | 378  | 161                            | 2,1   | 1,9  | -12                            | a)   | a)  | a)                           |
| 04-08-2020               | 222   | 1250   | 462                            | 49,7  | 14,4   | -71                            | 0,05   | 1,30  | 2559                         |
| 17-09-2020               | 214   | 248  | 16                             | 63,1  | 46,6   | -26                            | 0,05   | 0,91  | 1603                         |
| 04-11-2020               | 183   | 1019   | 456                            | 34,8  | 32,7   | -6                             | 0,08   | 0,17  | 121                          |
| 27-01-2021               | 293   | 356  | 21                             | 10,2  | 3,9  | -62                            | 0,05   | 0,06  | 16                           |
| 17-03-2021               | 27  | 135  | 406                            | 12,8  | 13,5   | 5                              | 0,03   | 0,05  | 69                           |
| 23-06-2021               | 369   | 81   | -78                            | 6,1   | 27,2   | 343                            | 0,08   | 0,21  | 169                          |
| <b>Gem<br/>± SD</b>      | <b>188 ± 115</b>                                  | <b>442 ± 447</b>                               | <b>135**</b>                   | <b>25,6 ± 22</b>                                  | <b>19,7 ±<br/>15,1</b>                         | <b>-23</b>                     | <b>0,05 ±<br/>0,02</b>                             | <b>0,39 ±<br/>0,51</b>                          | <b>668**</b>                 |

a) Meting op deze meetdag uitgevoerd met Gasera monitor i.p.v. FTIR, die voor N<sub>2</sub>O onbetrouwbare resultaten gaf.

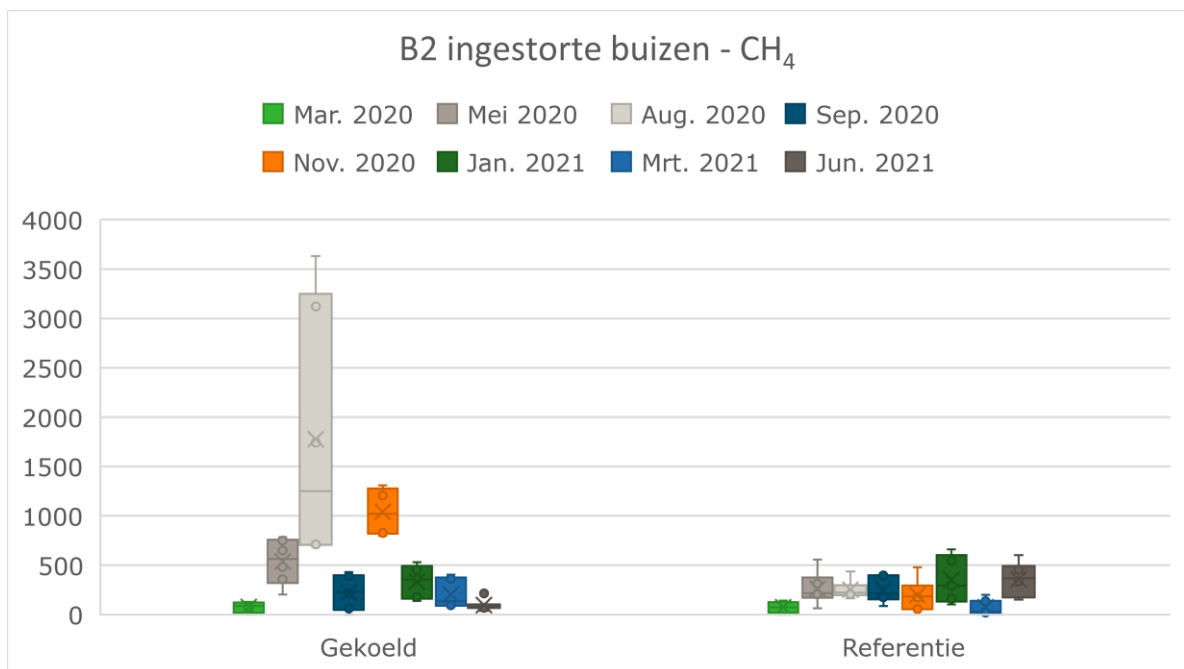
\* Significant ( $p < 0,05$ ) en \*\* trendmatig ( $0,05 < p < 0,1$ ) verschil tussen case en control, op basis van eenzijdige t-test.

Oranje: meet dagen uitgevoerd voor de plaatsing van elektrische mestmixers. Hier gepresenteerd vanwege het experimentele karakter van deze studie, en meegenomen in de gemiddelden omdat hierdoor niet direct verbetering in emissie optrad.





**Figuur 9** Boxplot metingen koeling van drijfmest bij de stal (B1) met afgezonken buizen. Y-as emissies in mg/m<sup>2</sup>/u CH<sub>4</sub>.



**Figuur 10** Boxplot metingen koeling van drijfmest bij de stal (B2) met ingestorte buizen. Y-as emissies in mg/m<sup>2</sup>/u CH<sub>4</sub>.

De metingen bij B1 lieten consequent lagere CH<sub>4</sub>-emissies voor de gekoelde kelder zien (- 45%), maar ook consequent hogere NH<sub>3</sub>-emissies (+ 75%). Echter op basis van een eenzijdige t-toets is alleen het laatste met een P-waarde van 0,046 net significant.

Bij B2 waren de emissies van CH<sub>4</sub> in de gekoelde kelder duidelijk hoger dan in de referentiekelder. De oorzaak hiervan moet mogelijk gezocht worden in de verschillen tussen case en control. Bijvoorbeeld is de mest van de gekoelde mestkelder in verbinding (via de doorsteek) met een niet gekoelde mestgang van een ander mestcircuit.

---

Daardoor is er aannemelijk dat lucht uitwisseling tussen deze mestkelder gangen ook plaats vindt. Verder lag de referentiekelder aan de voergang (voerresten zullen in de mest vallen) en waren daar geen boxen gelegen (met green bedding). Met name het laatste zou ervoor kunnen hebben gezorgd dat in de gekoelde kelder relatief veel en gemakkelijk afbreekbare organische stof aanwezig was. Ook was de gekoelde kelder voorzien van een emissiearme vloer, waar de referentie traditionele roosters had. Deze verschillen maken het moeilijk om een goede vergelijking van de emissies te kunnen maken.

Daarbij werd met een nog niet volledig uitontwikkelde/gevalideerde meetmethode gemeten (meetparaplu). Deze issues dwingen ons om zeer voorzichtig te zijn met het trekken van conclusies omtrent de (absolute) emissies.

Zoals eerder vermeld werden de koelsystemen gaandeweg verbeterd/geoptimaliseerd, bijvoorbeeld door vaker te mixen. In het geval van B2 werden daartoe ook elektrische mixers geïnstalleerd, voorafgaand aan de meting op 4 augustus 2020. Dit verklaart wellicht de grote variatie op die meetdag (om installatie mogelijk te maken werd de kelder geleegd).

### **Economische factoren**

Er zijn een aantal economische factoren die een rol spelen bij het implementeren van milieutechnologieën in het domein van de (melk)veehouderij. Hier worden de volgende aspecten als belangrijkste kostenposten kort behandeld: investeringskosten en (operationele) kosten van elektriciteitsverbruik. Omdat er nog geen beleidsinstrumenten of regelingen zijn om methaanemissiereductie te borgen en te belonen wordt hier alleen de warmte die ontstaat bij het koelen van mest als mogelijke economische bate meegenomen.

Wat betreft de investeringskosten waren de belangrijkste elementen van dit systeem een buizensysteem (200 m; Powerwave, PE100RC, met een diameter van 63 mm) bevestigd aan een verzwaard metalen frame. Een elektrische warmtepomp (fabricaat Wolf met 16 kW verwarmingsvermogen) was in de technische ruimte van de melkveehouder geïnstalleerd. Dit zijn ongeveer de basiselementen en dimensies van een koelsysteem voor een gemiddeld melkveebedrijf waarbij geen of weinig stalaanpassingen nodig zouden zijn. Na optimalisatie en standaardisatie zouden de investeringskosten (zeker) anders worden dan het huidige systeem. Zo is in latere versies de koelunit bijvoorbeeld in een zeecontainer geplaatst. Met de kennis van nu zouden de investeringskosten van dit (testuitvoering) mestkoelingsstelsel ergens tussen 125.000 en 135.000 euro excl. BTW (expert judgement) liggen.

Een terugkerende kostenpost is het elektriciteitsverbruik. Dit betreft met name het verbruik van de koelunit en de elektrische mixers. De mixers werden tijdens dit onderzoek relatief vaak gebruikt, namelijk drie keer per dag gedurende 10 minuten per keer. Het geschatte elektriciteitsverbruik van de mixer met dit gebruiksregime bij B1 was 1.005 kWh in een periode van ongeveer een jaar. De warmtepomp gebruikte in dezelfde periode bij dit bedrijf 8.233 kWh. Als we uitgaan van een prijs van 0,22 € per kWh dan zijn de totale kosten aan elektriciteit in 2020 ongeveer 221 (mixer) + 1.811 (warmtepomp) = 2.032 euro geweest. Door de hoge energieprijzen zouden deze kosten in 2022 hoger zijn geworden, maar ook de mogelijke winst van de geproduceerde warmte.

Aan de ene kant zijn er investerings- en operationele kosten, aan de andere kant wordt warmte aan de mest onttrokken die elders kan worden benut. Bij B1 en B2 wordt warmte naar de bedrijfswoning gebracht. Het systeem produceerde tijdens het experiment echter zoveel warmte dat het overschot naar de open lucht werd afgevoerd en verloren ging. De totale ingeschatte warmteproductie van het systeem bij B1 was 90 GJ (25.000 kWh). Om een inschatting te maken over wat deze warmte theoretisch zou kunnen opleveren nemen we de warmteprijs van de Autoriteit Consument & Markt (ACM). Dit zijn de prijzen voor warmte geleverd aan huishoudens via een warmtenet, en veronderstelt dus al de aanwezigheid van transportinfrastructuur (leidingen e.d.). De ACM berekende een maximale warmteprijs van 53,95 euro per gigajoule (GJ) (januari – juni 2022) en maximaal 48,60 euro/GJ (juli – december 2022)<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> Welke tarieven mag ik vragen voor het leveren van warmte? | ACM.nl (geraadpleegd september 2022).

---

Dat is meer dan een verdubbeling van het maximale tarief in 2021, toen was de maximale prijs nog € 25,51. In 2020 was de prijs per GJ 26,06 euro. B1 produceerde in 2020 25.000 kWh = 90 GJ. De ingeschatte warmte winst voor B1 zou in 2020 ongeveer 2.345 euro zijn. Aangezien er geen transportleidingen voor warmte liggen van melkveebedrijven naar warmtenetten, is dit bedrag nog zuiver theoretisch. Het ligt eerder voor de hand dat de warmte ter plekke tot waarde wordt gebracht (bv. voor nuttige drogingsprocessen).

Bij deze berekeningen moet er rekening worden gehouden met het experimentele karakter van de situatie en dat alleen de mest in een gedeelte van de mestkelders (case) werd gekoeld. Dus bij installatie in de gehele stal zouden deze kosten en baten kunnen stijgen (verdubbelen?) of dalen bij optimalisatie en standaardisatie. Verder moeten er nog specifieke toepassingen worden bedacht voor de geproduceerde warmte.

Het mestkoelingssysteem was niet zo efficiënt in het onttrekken van warmte/koelen van de mest dan van tevoren was gedacht. De lessen die zijn geleerd tijdens dit experiment zijn geïntegreerd in nieuwe uitvoeringen van het systeem (zie hieronder).

## 2.5 Conclusies, discussie en reflectie

De resultaten van de emissiemetingen moeten als indicatief geïnterpreteerd worden. Zoals eerder vermeld zijn er zeker bij B2 een aantal issues die de vergelijking tussen case en control bijna onmogelijk maken. Bij B1 is de case/control situatie beter vergelijkbaar en daar zien we een relatief hoge methaanemissie reductie, namelijk 45%. Maar er werd ook een consistent hogere NH<sub>3</sub>-emissie (+ 75%) waargenomen. Dat laatste kan veroorzaakt zijn door het frequente mixen (Van der Stelt et al., 2007). De spreiding van de emissieresultaten bij B1 (zie Figuur 9) maken het ook zeer moeilijk om het effect van koeling betrouwbaar vast te stellen.

Daarbij werden de metingen zelf gaandeweg aangepast. Tijdens de meetdagen in januari en maart 2020 werd geëxperimenteerd met verschillende manieren van meten (statisch of dynamisch) en werden tevens referentiemonsters genomen. Sindsdien zijn er echter weer nieuwe inzichten in de wijze van meten en dataverwerking ontstaan, om in de uiteindelijke methodevalidatie mee te nemen. Hierbij spelen meer fundamentele vragen omtrent emissiepatronen eveneens een rol. Waar sommige metingen van CH<sub>4</sub> een gelijkmatige stijglijn laten zien, komen eveneens situaties met snelle initiële stijgingen of afvlakkende emissies voor. Het eerste fenomeen wordt mogelijk verklaard door de verstoring van de aanwezige schuimlaag (deze bellen bevatten veel methaan). Voor het tweede is nog geen verklaring gevonden. Als in plaats van begin- en eindniveau met raaklijnen zou worden gewerkt, zouden hier duidelijk hogere emissies worden gevonden.

Al deze zaken maken dat de metingen een sterk indicatief karakter hebben.

Met deze wetenschap, maar om een beeld van het methaanemissiereductiepercentage en ammoniakemissiestijgingspercentage te kunnen schetsen, worden hier nu de gemiddelde emissiewaarden naar kg CH<sub>4</sub> en NH<sub>3</sub> per dierplaats per jaar gegeven en worden deze met in de Emissieregistratie gehanteerde waarden vergeleken (Tabel 6):

**Tabel 6** Vergelijking van omgerekende (kg CH<sub>4</sub>/melkkoe/jaar) waargenomen methaanemissies uit mest en ammoniakemissies (kg NH<sub>3</sub>/melkkoe/jaar) in B1 en B2 met door de Emissieregistratie en in de Rav gehanteerde waarden (kg CH<sub>4</sub>/melkkoe/jaar en kg NH<sub>3</sub>/melkkoe/jaar). Voor ammoniak is 25 – 40 % (Van Dooren et al., 2019) aangenomen als bijdrage van de kelderemissie aan de totale emissie.

| Melkveebedrijf en type emissies   | Gekoelde mestkelder            | Niet gekoelde mestkelder       | Emissieregistratie/Rav                                   |
|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|
| <b>B1 CH<sub>4</sub> uit mest</b> | 8,9 kg CH <sub>4</sub> /mk/jr  | 16,3 kg CH <sub>4</sub> /mk/jr | 37,6 kg CH <sub>4</sub> /mk/jr                           |
| <b>B1 NH<sub>3</sub> uit mest</b> | 0,9 kg NH <sub>3</sub> /mk/jr  | 0,5 kg NH <sub>3</sub> /mk/jr  | 3,3 (25%) - 5,2 (40% van 13,0) kg NH <sub>3</sub> /mk/jr |
| <b>B2 CH<sub>4</sub> uit mest</b> | 42,3 kg CH <sub>4</sub> /mk/jr | 12,7 kg CH <sub>4</sub> /mk/jr | 37,6 Kg CH <sub>4</sub> /mk/jr                           |
| <b>B2 NH<sub>3</sub> uit mest</b> | 1,9 kg NH <sub>3</sub> /mk/jr  | 1,7 kg NH <sub>3</sub> /mk/jr  | 3,3 kg (25%) - 5,2 (40% van 13,0) NH <sub>3</sub> /mk/jr |

Er zijn een aantal geleerde lessen en aandachtspunten die worden opgepakt in vervolgstudies:

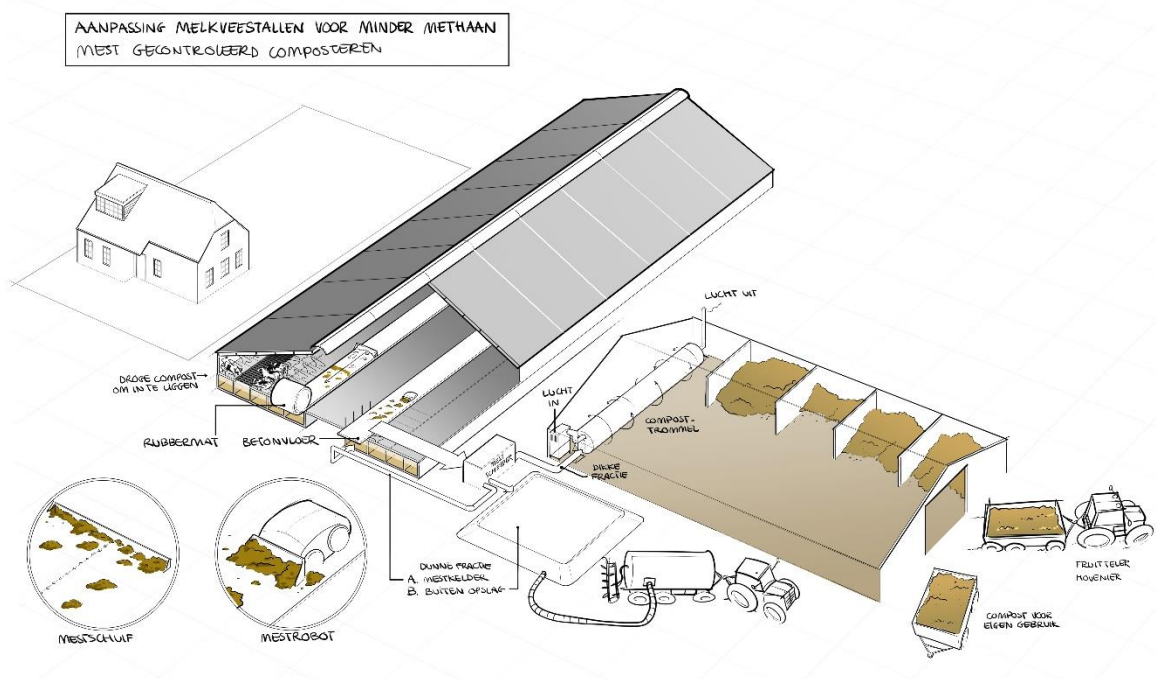
- Theoretisch is het mogelijk om een hogere reductie van de methaanemissie uit mest te krijgen bij het bereiken van lagere mesttemperaturen.
- Theoretisch is het ook mogelijk om een ammoniakemissiereductie uit de mest te bereiken bij lagere mesttemperaturen. Echter zou mest mixen een toename van de ammoniakemissie kunnen veroorzaken (Van der Stelt et al., 2007).
- Er blijkt een veel grotere lengte aan leidingen in de mestkelder nodig om voldoende warmte-uitwisselingscapaciteit te kunnen genereren dan van tevoren gedacht.
- Het onttrekken van warmte aan mest met dit systeem kost energie. Een balans moet worden gevonden tussen de investerings- en operationele kosten en baten. De belangrijkste korte termijn voorwaarden zijn emissiereductie en warmteproductie. Restwarmte zou zoveel mogelijk benut moeten worden.
- In combinatie met de lokale productie van hernieuwbare energie kan het systeem bijdragen aan het benutten van productiepieken die anders moeten worden afgekapt vanwege de netcapaciteit, of tegen lage tarieven verkocht. B1 bijvoorbeeld heeft inmiddels meer dan 1.000 zonnepanelen en twee windmolens (ongeveer 10 kW) waardoor de operationele kosten qua energiegebruik volledig gecompenseerd kunnen worden.
- De onttrokken warmte uit mest is nu voor beide bedrijven groter dan de warmte die ze voor het verwarmen van de bedrijfswoning nodig hebben. Het overschot wordt momenteel naar de lucht geloosd. In de toekomst zullen andere bestemmingen moeten worden bedacht en in het systeem mee-ontworpen moeten worden. Denk bijvoorbeeld aan gras of mest drogen.
- Zoals werd verwacht, wijzen de praktijkexperimenten uit dat het mestvolume geregeld (meermaals per dag) gemixt moet worden om de temperatuur in het volume homogeen te krijgen en te houden. Dit is op te lossen met elektrische mixers, die dus aangeschaft moeten worden naast het koelingssysteem als ze nog niet op het bedrijf aanwezig zijn.
- Bij het installeren van mestkoelingssystemen in bestaande stallen moet er rekening worden gehouden met complexe structuren van mestkelders (schotten, muren, overgangen, etc.). Dit om te zorgen dat de leidingen de temperatuur van de mest in 'alle' kelders en hoeken hiervan kunnen beïnvloeden en dat de mixers overal hun functie kunnen uitvoeren. Het aantal mixers dat geïnstalleerd moet worden kan dus per bedrijf variëren. Ook kan het voor sommige mestkelders lastig worden om overal de koelingsbuizen goed te installeren, bijvoorbeeld onder de boxen.
- Omdat de leidingen in de mest liggen, onder de roostervloer, is er weinig zicht op eventuele lekkages vanuit de koelingsbuizen, en is reparatie bij schade moeizaam. Als glycol wordt gebruikt als koelmiddel dient een zuivere variant gebruikt te worden die biologisch afbreekbaar is.

Op basis van deze conclusies en geleerde lessen zijn er binnen het kader van het Klimaatenvolop onderzoek twee nieuwe mestkoelingssystemen ontworpen die momenteel worden getest. De resultaten zullen in 2023 worden gepubliceerd.

- 
1. Mestkoeling 2.0. Bij het melkveebedrijf B1 in Hellingum werd in 2021 een nieuw systeem geïnstalleerd, getest en bemeten. De koelleidingen drijven in de bovenste laag van de mest. Dit moet ervoor zorgen dat de bovenste laag van de mest sneller wordt gekoeld en koel blijft. Daarbij is er een externe koelunit met een hoger vermogen geïnstalleerd. De meetreeks met dit systeem is in april 2022 afgerond.
  2. Mest extern koelen en de gekoelde mest op een andere plek in de mestkelder terugbrengen. Er werd een experiment in praktijkomstandigheden uitgevoerd met interessante resultaten. Momenteel wordt een verbeterde versie van dit systeem bij het melkveebedrijf in Hellingum geïnstalleerd en getest.

### 3 Mest scheiden en dikke fractie gecontroleerd composteren

Daniel Puente-Rodríguez, Jan Vonk, A.P. (Bram) Bos & André J.A. Aarnink



#### 3.1 Principe & ervaringen

Het frequent verwijderen van mest uit mestkelders en vanaf stalvloeren kan helpen om emissies van methaan en ammoniak te verminderen, doordat het emitterend oppervlak verkleind wordt en opslagtemperatuur bij externe opslag doorgaans lager is. Dit kan gecombineerd worden met primaire of secundaire scheiding van feces en urine. Met primaire scheiding wordt het zoveel mogelijk gescheiden houden van urine en vaste mest direct na excretie bedoeld, bijvoorbeeld door giergoten/-gaten of drainerende vloeren. Hoewel primaire scheiding nog weinig wordt toegepast op melkveebedrijven, wordt dit in kringen van wetenschappers en beleidsmakers wel gezien als een belangrijke optie om emissies en mineralenbenutting integraal aan te kunnen pakken. Secundaire scheiding betreft het splitsen van drijfmest in een dunne en dikke fractie met behulp van mestscheidingstechnieken zoals een vijzelpers of centrifuge.

Als de mest frequent uit de stal en/of mestkelder verwijderd wordt, moet het elders worden opgeslagen. Het is dan vervolgens wel zaak ervoor te zorgen dat er geen emissies van methaan en ammoniak vanuit de mestopslagen plaatsvinden.

Eén van de manieren om methaanvorming uit opgeslagen mest te voorkomen is gecontroleerd composteren. Bij gecontroleerd composteren wordt de (primair of secundair) gescheiden dikke fractie onder gecontroleerde omstandigheden belucht, gehygiëniseerd en gecomposteerd. Dit kan plaats vinden met momenteel al beschikbare composteringstrommels. In een eventueel nageschakeld proces kan het gecomposteerde product tot mestkorrels worden verwerkt. Droging en compostering zijn hierbij aerobe processen.

---

Door de dikke fractie te beluchten kunnen zuurstofminnende micro-organismen het organisch materiaal afbreken. Aerobe omstandigheden verlagen of elimineren op zichzelf al methaanemissies (Amon et al., 2001; Amon et al., 2006a; Hao et al., 2001; Hoeksma et al., 2012). Hierdoor zal methaanvorming in de trommel beperkt zijn. Tijdens dit proces kan echter wel ammoniak (NH<sub>3</sub>) en lachgas (N<sub>2</sub>O) gevormd worden (Hoeksma et al., 2012 en referenties daarin). Om de emissie van ammoniak te voorkomen is het mogelijk om een relatief kleine luchtwasser achter de luchtuitlaat van de composteringstrommel te plaatsen. Voor lachgas is echter geen afvangtechniek beschikbaar, waardoor een gedeelte van de BKG-reductie weer tenietgedaan zal worden.

Binnen dit project is voor twee verschillende systemen bij melkveebedrijven nagegaan of het zinvol was ze verder te bemeten:

- Een geïntegreerde vijzelpers i.c.m. composteringstrommel. Dit is een standaard systeem dat al op de markt beschikbaar is (BeddingMaster).
- Drijfmest in twee stappen scheiden, met toevoeging van vlokmiddelen in de tweede scheidingsstap en vervolgens composteren in een composteringstrommel. Dit is een meer geavanceerd proces, dat nog niet breed wordt toegepast, maar ook beschikbaar is in de markt.

Hieronder bespreken we met name het eerste systeem. Dit is al praktijkrijp en kan nu al geïmplementeerd worden op melkveebedrijven. Het is wel belangrijk bij het lezen van dit hoofdstuk te bedenken dat dit systeem niet ontwikkeld is met het oog op methaanemissiereductie. Door de korte duur van compostering bij dit systeem ontstaat een product dat feitelijk nog niet als compost geclassificeerd kan worden, maar wel gewild is bij hoveniers e.d. en tevens geëxporteerd kan worden omdat het gehygiëniseerd is. Voor een aantal bedrijven is dit systeem interessant en efficiënt voor het verwerken van het mestoverschot (via hygiënisering en commercialisatie, export) en/of de productie van beddingmateriaal voor de ligboxen. Uit bedrijfseconomisch oogpunt wordt dit systeem gebruikt als alternatief voor reguliere green bedding in verband met de uiergezondheid.

Bij het tweede systeem hebben we na een lang proces geen toegang gekregen om metingen uit te kunnen voeren omdat er geen overeenstemming kon worden bereikt over de onvoorwaardelijke publicatie van de resultaten van het onderzoek, gevoegd bij de vrees voor toenemende concurrentie.

## 3.2 Kritische aspecten van beschikbare technieken

Op dit moment worden er bij relatief grote bedrijven (> 150 koeien) in de meeste gevallen naar verhouding kleine composteringstrommels gebruikt. De firma Mavasol<sup>11</sup> (distributeur van DariTech<sup>12</sup> apparatuur buiten Noord-Amerika) bijvoorbeeld levert composteringstrommels met een diameter van 1,81 m en een lengte van 6,10 m met een inhoud van 16 m<sup>3</sup>. Deze trommels kunnen circa 16 ton dikke fractie (ca. 38% droge stof - DS) uit rundveedrijfmest per dag verwerken. De dikke fractie warmt snel op (binnen enkele uren) aan de invoerzijde van de liggende roterende trommel en koelt daarna geleidelijk af richting afvoerzijde. Voor beluchting van de dikke fractie in de BeddingMaster wordt buitenlucht ingevoerd op de plaats waar de bewerkte dikke fractie de BeddingMaster verlaat (dus in tegenstroom).

De temperatuur van de net gescheiden dikke fractie aan de invoerzijde kan oplopen tot ca. 58 °C en aan de afvoerzijde 45 °C (persoonlijke communicatie, juni 2020).

Onder deze omstandigheden is het uitkomende materiaal bij een verblijftijd van 12 à 13 uur gehygiëniseerd en kan dus bijvoorbeeld worden geëxporteerd. Een langere verblijftijd zou een hoger percentage droge stof opleveren, en waarschijnlijk ook een biologisch meer stabiel materiaal.

---

<sup>11</sup> <https://www.mavasol.com/> (geraadpleegd april 2021).

<sup>12</sup> <https://dairytechinc.com/> (geraadpleegd april 2021).

Emissietechnisch is dit systeem interessant, maar een kritisch punt is de efficiëntie van de voorafgaande scheiding, en gerelateerd daarmee de hoeveelheid organische stof die achterblijft in de dunne fractie, en daar alsnog een bron van methaan kan zijn. Deze dunne fractie wordt meestal in silo's opgeslagen, en deze silo's zijn bewust niet geheel gasdicht gemaakt om ontploffingsgevaar te voorkomen.

Relatief simpele en goedkope scheidingstechnieken zoals vijzelpersen en trommelfilters laten rond de 40-50% van de organische stof die aanwezig is in drijfmest achter in de dunne fractie, zie Tabel 7 hieronder.

**Tabel 7** Scheidingsresultaten en -rendementen bij scheiding van rundveedrijfmest met trommelfilter en vijzelpers (Evers et al., 2010; zie ook Timmerman et al., 2009).

|                            | Hoe-<br>veel-<br>heid<br>(kg) | Droge<br>stof<br>g/kg | Organ.<br>stof<br>g/kg | Stikstof<br>N-totaal<br>g/kg | N-<br>min.<br>g/kg | N-<br>org.<br>g/kg | Fosfaat<br>P <sub>2</sub> O <sub>5</sub><br>g/kg | Kali<br>K <sub>2</sub> O<br>g/kg |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|--|----------------------------------|
| Ingaande drijfmest         | 1000                          | 77                    | 61                     | 3,29                         | 1,6                | 1,7                | 0,99   | 5,7                              |
| <b>Trommelfilter</b>       |                               |                       |                        |                              |                    |                    |  |                                  |
| Dikke fractie              | 153                           | 221                   | 197                    | 3,96                         | 1,4                | 2,6                | 1,59   | 5,1                              |
| <i>Scheidingsrendement</i> |                               | 43 %                  |                        | 18%                          |                    |                    | 25%  |                                  |
| Dunne fractie              | 847                           | 51                    | 36                     | 3,15                         | 1,6                | 1,5                | 0,91   | 5,7                              |
| <b>Vijzelpers</b>          |                               |                       |                        |                              |                    |                    |  |                                  |
| Dikke fractie              | 210                           | 201                   | 163                    | 4,09                         | 1,6                | 2,5                | 1,60   | 4,6                              |
| <i>Scheidingsrendement</i> |                               | 55 %                  |                        | 26%                          |                    |                    | 34%  |                                  |
| Dunne fractie              | 790                           | 44                    | 31                     | 2,72                         | 1,4                | 1,3                | 0,78   | 5,1                              |

De composteringstrommel zou een effectieve methode kunnen zijn om methaanemissies uit de dikke fractie te voorkomen, gesteld dat de compostering voldoende is gevorderd. De literatuur rondom composteren van mest of dikke fractie geeft positieve resultaten weer t.a.v. methaanemissiereductie (Amon et al., 2001; Amon et al., 2006a; Hao et al., 2001; Hoeksma et al., 2012). Dit zou met aanvullend emissieonderzoek bevestigd en beter onderbouwd moeten worden.

Binnen dit project is een lab analyse van de verschillende meststromen uitgevoerd, die afkomstig zijn van een bedrijf met een vijzelpers en een composteringstrommel (BeddingMaster). Het doel was om inzicht te krijgen in de methaanemissie van de verschillende meststromen.

### 3.3 Systeembeschrijving

De meststromen van een melkveebedrijf met 240 dierplaatsen zijn geanalyseerd. De koeien in dit bedrijf blijven jaarrond op stal. Het bedrijf heeft 120 ha grond waarvan op 20 ha maïs wordt verbouwd. Het rantsoen is het gehele jaar vrijwel hetzelfde, behalve tussen april en september. Dan staat er ook gemaaid vers gras op het menu (zomerstalvoeding).

De huisvesting wordt gekarakteriseerd door een sleufvloer met rubberen stroken en een mestschuif (A 1.8; 11,8 kg NH<sub>3</sub>/dierplaats/jaar). De stal is niet onderkelderd behalve aan de kop van de stal waar een kleine verzamelkelder ligt. De mestschuif brengt de mest naar het einde van de stal. Daar is een opening van zo'n 50 cm. De afmetingen van de kelder zijn: lengte 30 m, breedte 4 m, diepte 1,5 m. In de doorsteek boven deze kelder ligt een ammoniakemissiearme vloer met kleppen.

De drijfmest wordt in de verzamelkelder dagelijks gemixt en naar het naastliggende gebouw verpompt waar de geïntegreerde mestscheider en trommel staan. Deze pomp wordt aangestuurd door een tijdschakelaar in de elektrokast van de BeddingMaster.

De vijzelpers om de mest te scheiden staat boven de composteringstrommel. De dikke fractie valt in de trommel. Zoals eerder vermeld, is de verblijftijd 12 à 13 uur. De temperatuur aan de afvoerszijde is rond 45 °C en bij de invoerszijde rond 58 °C. De temperatuur wordt met sensoren gemonitord.



---

Het drogestofgehalte van de dikke fractie is ca. 38% voorafgaand en ca. 40% na dit proces (persoonlijke communicatie, juni 2020). Er wordt waterdamp c.q. condenswater afgevoerd. Voor dit specifieke bedrijf wordt ingeschat dat er relatief weinig ammonium stikstof in de dikke fractie zit (op basis van De Buissonjé, 2013). Hoe dan ook is de ammoniakemissie hier een aandachtspunt. Oplossing kan zijn om een (kleine) chemische luchtwasser te plaatsen.

Na dit proces geldt de dikke fractie als gehygiëniseerd en kan bijv. geëxporteerd worden.<sup>13</sup> Vanwege de relatief korte verblijftijd is de verwachting dat het geproduceerde materiaal nog geen stabiele compost is.

Het gehygiëniseerde product wordt korte tijd naast de trommel opgeslagen en gemengd met kalk. Wekelijks wordt dit materiaal als ligmateriaal in de ligboxen gestrooid, en keert grotendeels terug in het proces omdat dit ligmateriaal langzamerhand uit de boxen op de sleufvloer bij de verse mest belandt. Mocht er nog ammoniakale stikstof in dit materiaal aanwezig zijn, dan kan dit mogelijk tot ammoniakemissie leiden.

De dunne fractie gaat vanuit de vijzelpers via een leiding naar twee silo's van ieder 2.500 m<sup>3</sup>. Deze zijn van beton gemaakt en hebben een spankap.

## 3.4 Lab analyses

Analyses van het methaanproductiepotentieel (*biochemical methane potential* - BMP) en actuele, daadwerkelijke methaanproductie (*actual methane production* - AMP) werden uitgevoerd. BMP betreft de hoeveelheid methaan die potentieel uit de organische stof in de opgeslagen mest, op het monstertijdstip, kan worden gevormd. AMP betreft de hoeveelheid methaan die wordt geproduceerd door afbraak van organische stof van de opgeslagen mest op het moment van bemonstering (vergelijkbare in-situ temperatuur en zonder toegevoegd inoculum) (Elsgaard et al., 2016).

Het BMP en de AMP van verschillende meststromen en materialen in dit systeem zijn geanalyseerd.

Er zijn biogastesten (BMP-bepalingen) uitgevoerd met 4 mestmonsters:

- a) De (verse) drijfmest die de vijzelpers in gaat, hierna omschreven als 'verse drijfmest'.
- b) De dunne fractie uit de vijzelpers, voordat die naar de opslag gaat, hierna omschreven als 'dunne fractie'.
- c) De dikke fractie uit de vijzelpers, voordat die in de trommel gaat, hierna omschreven als 'dikke fractie'.
- d) De dikke fractie na voltooiing van het hygiëniseringsproces in de trommel, hierna omschreven als 'dikke fractie eind'.

Daarnaast is van 2 mestmonsters de actuele methaanproductie (AMP) bepaald volgens het protocol dat binnen het EU-project M4Models<sup>14</sup> is ontwikkeld (zie ook Elsgaard et al., 2016). Het gaat om de volgende 2 meststromen:

- e) Het gehygiëniseerde product gebruikt in de ligboxen (ouder en vers door elkaar). Hierna omschreven als 'monster 1'.
- f) De dunne fractie die zich in de buitenopslag bevindt. Hierna omschreven als monster 2'.

### 3.4.1 Materialen en methode

De analyses werden door de onderzoeksorganisatie LeAF<sup>15</sup> uitgevoerd. In dit rapport nemen we de beschrijving van de methode en de resultaten zoals aangeleverd door LeAF (Hulsman et al., 2020) bijna letterlijk over, tekstuele aanpassingen en analyses zijn toegevoegd voor de leesbaarheid en de duiding van de resultaten.

---

<sup>13</sup> <https://www.nvwa.nl/onderwerpen/mest/mestverwerking-en-hygienisatie> (geraadpleegd april 2021).

<sup>14</sup> <https://research.wur.nl/en/projects/eu-20022-m4models-bo-59-101-002> (geraadpleegd april 2021).

<sup>15</sup> [www.leaf-wageningen.nl/nl/leaf.htm](http://www.leaf-wageningen.nl/nl/leaf.htm).

---

Gedurende de tijd tussen aanlevering van de monsters en het inzetten van de test zijn de BMP-monsters opgeslagen bij 4 °C en de AMP-monsters bij een incubatietemperatuur (20 °C) vergelijkbaar aan de temperatuur van de verschillende fracties tijdens de monsternamen op het melkveebedrijf.

Er is een karakterisering van het materiaal uitgevoerd op basis van de gehalten droge en organische stof. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 8.

#### **3.4.1.1 Biochemisch methaanpotentieel (BMP)**

De testen voor de bepaling van het biogaspotentieel zijn uitgevoerd in duplo, in 1-literflessen met een totaal vloeistof volume van 200 ml. Het entmateriaal bestond uit digestaat van de vergister op rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) Ede. Een controletest met alleen entmateriaal is uitgevoerd om te kunnen corrigeren voor endogene biogasproductie uit het entmateriaal. Aan alle flessen zijn macronutriënten, sporenelementen en een fosfaatbuffer toegevoegd. De testen zijn uitgevoerd bij 35 °C onder continue menging op een schudbak (100 rpm). Voor aanvang van de testen is de gasfase van alle flessen vervangen door stikstofgas. Gedurende de test werd de gasproductie regelmatig gevolgd met behulp van een drukmeetsysteem. Aan het begin en eind van de test is de pH gemeten. Aan het eind van de test is ook de biogassamenstelling geanalyseerd. De testperiode was 42 dagen.

#### **3.4.1.2 Actuele methaanproductie (AMP)**

De AMP-bepaling is uitgevoerd volgens het protocol dat binnen het EU-project M4Models is ontwikkeld. Bij de AMP-bepaling zijn de monsters eerst gezeefd over een 2 mm zeef. De droge en organische stof zijn voor en na het zeven geanalyseerd. Met de gezeefde monsters is de methaanproductie gemeten, zowel na 1 dag (test uitgevoerd in 6-voud), 2 dagen (test uitgevoerd in 3-voud) als na 7 dagen (test uitgevoerd in 3-voud). De incubatietemperatuur was 20 °C zoals bij de monsternamen en zonder verdere toevoegingen.

#### **3.4.1.3 Analyses**

##### *Gasproductie en -samenstelling*

Het volume geproduceerd biogas werd bepaald met behulp van een drukmeetsysteem. De gehalten methaan en koolstofdioxide in het biogas werden gaschromatografisch bepaald.

##### *Droge en organische stofgehalte*

Het gehalte droge en organische stof werd bepaald volgens de standaardmethode, met droging van de monsters bij 105 °C en verassing bij 550 °C.

## 3.5 Resultaten

**Tabel 8** Resultaten van de gehalten droge en organische stof van de monsters (Hulsman et al., 2020). Monster 1: het gehygiëniseerde product gebruikt in de ligboxen. Monster 2: de dunne fractie in de buitenopslag.

| Monster               | aankomst datum | DS (g/kg nat) | OS (g/kg nat) | % OS in DS |
|-----------------------|----------------|---------------|---------------|------------|
| <i>BMP monsters</i>   |                |               |               |            |
| verse drijfmest       | 8-9-2020       | 117           | 84,7          | 72         |
| dunne fractie         | 8-9-2020       | 90,1          | 59,1          | 66         |
| dikke fractie         | 8-9-2020       | 391           | 326           | 83         |
| dikke fractie eind    | 8-9-2020       | 441           | 356           | 81         |
| <i>AMP monsters</i>   |                |               |               |            |
| Monster 1, voor zeven | 8-9-2020       | 577           | 354           | 61         |
| Monster 1, na zeven   | 8-9-2020       | 616           | 371           | 60         |
| Monster 2, voor zeven | 8-9-2020       | 86            | 56            | 65         |
| Monster 2, na zeven   | 8-9-2020       | 85            | 55            | 65         |

### AMP

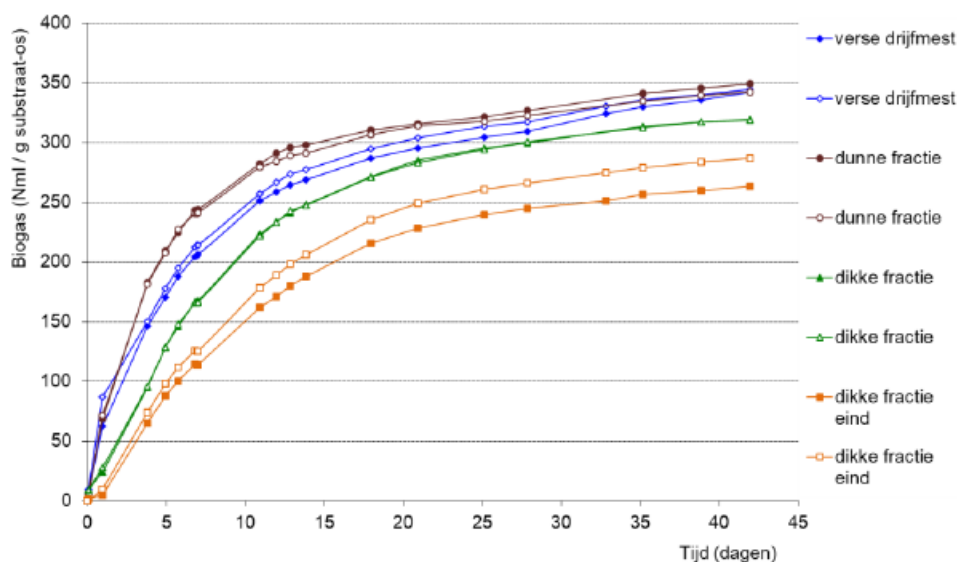
In Tabel 9 staan de gemiddelde waarden voor de actuele methaanproductiesnelheid weergegeven onder de condities zoals aangetroffen in de stal (qua temperatuur en zonder toevoegingen), en de methaan- en koolstofdioxidegehalten in de testtubes aan het eind van de test. Alleen in monster 2 (dunne fractie uit de mestsilo's) werd na 7 dagen methaan aangetroffen boven de detectiegrens van 0,5%.

**Tabel 9** Samenvatting van AMP-testresultaten (bij 20 °C). Monster 1: gehygiëniseerd product ligboxen. Monster 2: dunne fractie silo's.

| Monster nr. | testperiode |      | CH <sub>4</sub> productiesnelheid (ml CH <sub>4</sub> /g OS-monster/d) |       | gassamenstelling aan het eind van de test |       |                           |       |
|-------------|-------------|------|--|-------|---|-------|---------------------------|-------|
|             | uur         | dag  | gemid.   | stdev | % CH <sub>4</sub> in tube                 |       | % CO <sub>2</sub> in tube |       |
|             |             |      | gemid.   | stdev | gemid.                                    | stdev | gemid.                    | stdev |
| 1           | 22          | 0,90 | <0,1   | 0,00  | <0,5                                      | 0,0   | 0,7                       | 0,1   |
| 1           | 46          | 1,91 | <0,05  | 0,00  | <0,5                                      | 0,0   | 1,4                       | 0,0   |
| 1           | 166         | 6,90 | <0,01  | 0,00  | <0,5                                      | 0,0   | 4,7                       | 0,1   |
| 2           | 21          | 0,90 | <0,6   | 0,00  | <0,5                                      | 0,0   | 3,7                       | 0,1   |
| 2           | 45          | 1,87 | <0,3   | 0,00  | <0,5                                      | 0,0   | 4,8                       | 0,4   |
| 2           | 165         | 6,90 | 0,23   | 0,04  | 1,2                                       | 0,2   | 8,0                       | 0,3   |

### BMP

In Figuur 11 wordt het verloop van de biogasproductie uit de monsters weergegeven onder optimale vergistingsomstandigheden. In Tabel 10 staan daarnaast ook de gemiddelde waarden voor de biogasproductie weergegeven, en het methaangehalte van het biogas. Alle getallen zijn gecorrigeerd voor de gasproductie uit de blanco/controle met alleen entmateriaal. Aan het einde van de testperiode was de pH voor alle monsters neutraal.



**Figuur 11** Biogasproductie in Nm<sup>3</sup> biogas/g substraat-OS.

**Tabel 10** Samenvatting van de testresultaten (duplobepaling).

| Monster            | Biogasproductie                     |                                  | CH <sub>4</sub> gehalte biogas |
|--------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
|                    | (Nm <sup>3</sup> /ton substraat-OS) | (Nm <sup>3</sup> /ton substraat) | (%)                            |
| verse drijfmest    | 343 ± 1                             | 29 ± 0                           | 63                             |
| dunne fractie      | 346 ± 4                             | 20 ± 0                           | 64                             |
| dikke fractie      | 319 ± 0                             | 104 ± 0                          | 59                             |
| dikke fractie eind | 286 ± 12                            | 98 ± 4                           | 59                             |

Deze testen zijn uitgevoerd bij 35 °C onder standaard (ideale) laboratoriumcondities met een niet-geadapteerd inoculum. De verkregen resultaten geven dan ook het maximale biogaspotentieel onder deze standaardcondities. Afhankelijk van de toegepaste procescondities zou de biogasopbrengst in de praktijk zowel hoger als lager kunnen uitvallen.

### Verdere overwegingen

Voordat we uit het LeAF-rapport conclusies kunnen trekken moeten deze getallen naar stal-/koe niveau worden omgerekend. De AMP van het gehygiëniseerde product in de ligboxen is in deze analyse verwaarloosbaar te noemen. We berekenen hier daarom enkel de emissie uit de dunne fractie.

Hiervoor nemen we de OS (g/kg nat) voor het zeven van de dunne fractie (Tabel 8) omgerekend naar OS/m<sup>3</sup> en vermenigvuldigen dit met ml CH<sub>4</sub>/g OS-monster/dag (Tabel 9) en rekenen het resultaat om naar l CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup>/dag:

$$56.000 \text{ OS (kg/m}^3 \text{ nat)} * 0,23 \text{ ml} \times 10^3 \text{ CH}_4/\text{kg OS-monster/d} = 12.880 \text{ ml CH}_4/\text{m}^3 \text{ dunne fractie/dag}$$

De volgende stap is het omrekenen naar stal/koe niveau.

De koeien produceren ongeveer 7.000 m<sup>3</sup> mest per jaar, waarvan ongeveer 20% dikke fractie en 80% dunne fractie.

De dikke fractie komt door het scheiden en hergebruik als beddingmateriaal weer in de drijfmest terecht. Jaarlijks wordt in dit bedrijf rond 5.600 m<sup>3</sup> dunne fractie geproduceerd (inschattingen veehouder). Dus

5.600 m<sup>3</sup> dunne fractie \* 12,88 l CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> dunne fractie/dag = dit bedrijf produceert jaarlijks 72.128 l CH<sub>4</sub>.

Er zijn 240 melkkoeien op dit bedrijf zodat er uit de dunne fractie (en uit de mest als we de AMP-waardes uit de dikke fractie als verwaarloosbaar beschouwen) per koe 300,5 l CH<sub>4</sub> per dag geproduceerd wordt.

De soortelijke massa van methaan bij 0 °C is 0,72 kg/m<sup>3</sup>. Een productie uit de mest van 300,5 l/dag betekent bij een opslag van gemiddeld 180 dagen van deze mest een productie van 38,9 kg CH<sub>4</sub>/jaar. Deze hoeveelheid is vergelijkbaar met de waarde gehanteerd in de door het RIVM jaarlijks uitgevoerde inventarisatie van broeikasgasemissies (Ruysenaars et al., 2022), zie Tabel 11.

**Tabel 11** CH<sub>4</sub> afgeleide emissiefactoren (kg/dier/jaar) voor mestmanagement gespecificeerd per diercategorie, 1990–2020 (Ruysenaars et al., 2022).

| Animal category     | 1990  | 1995  | 2000  | 2005  | 2010  | 2015  | 2018  | 2019  | 2020  |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Mature dairy cattle | 23,07 | 24,10 | 27,97 | 31,07 | 34,87 | 36,72 | 38,80 | 38,99 | 37,57 |
| Other mature cattle | 7,42  | 7,53  | 7,50  | 7,84  | 8,04  | 8,01  | 6,88  | 6,77  | 6,80  |
| Growing cattle      | 6,87  | 7,04  | 6,62  | 6,30  | 7,05  | 7,88  | 7,85  | 7,93  | 7,84  |

## 3.6 Conclusies

Deze composteringstrommels zijn niet ontworpen om de methaanemissie te reduceren. Wat dit betreft is een fundamenteel probleem van dit systeem de efficiëntie van de vijzelpers i.c.m. een niet geheel gasdichte opslag van de dunne fractie in de silo's. Tabel 8 laat zien dat in dit bedrijf van de 84,7 g organische stof per kg (nat) uit de drijfmest, 59,1 g organische stof per kg is terug te vinden in de dunne fractie die opgeslagen is in de silo's. We verwachten dan ook dat er aanzienlijke methaanemissie in deze opslagen van de dunne fractie kan ontstaan. Dit zal waarschijnlijk afhankelijk zijn van de hoeveelheid makkelijk afbreekbare OS in deze dunne fractie (en andere factoren zoals temperatuur, etc.).

De potentiële biogasproducties in alle mestfracties is hoog. Daarom is het aan te bevelen om deze fracties niet langdurig op te slaan, omdat anders alsnog veel methaan uit deze fracties kan emitteren. Wat dit betreft moet er rekening worden gehouden met de wettelijk verplichte opslagduur en de opslagcondities. Dit geldt waarschijnlijk in iets mindere mate voor de vaste fractie. In de AMP-bepaling van de dikke fractie werd de detectiegrens voor methaan immers niet bereikt.

Dit systeem heeft dus de potentie om de methaanemissie uit de dikke fractie te reduceren. In dit bedrijf wordt echter het gehygiëniseerde product in de ligboxen gebruikt en komt het dan weer terecht in de mest. Als het meteen zou worden afgezet is wel een perspectief op methaanemissiereductie.

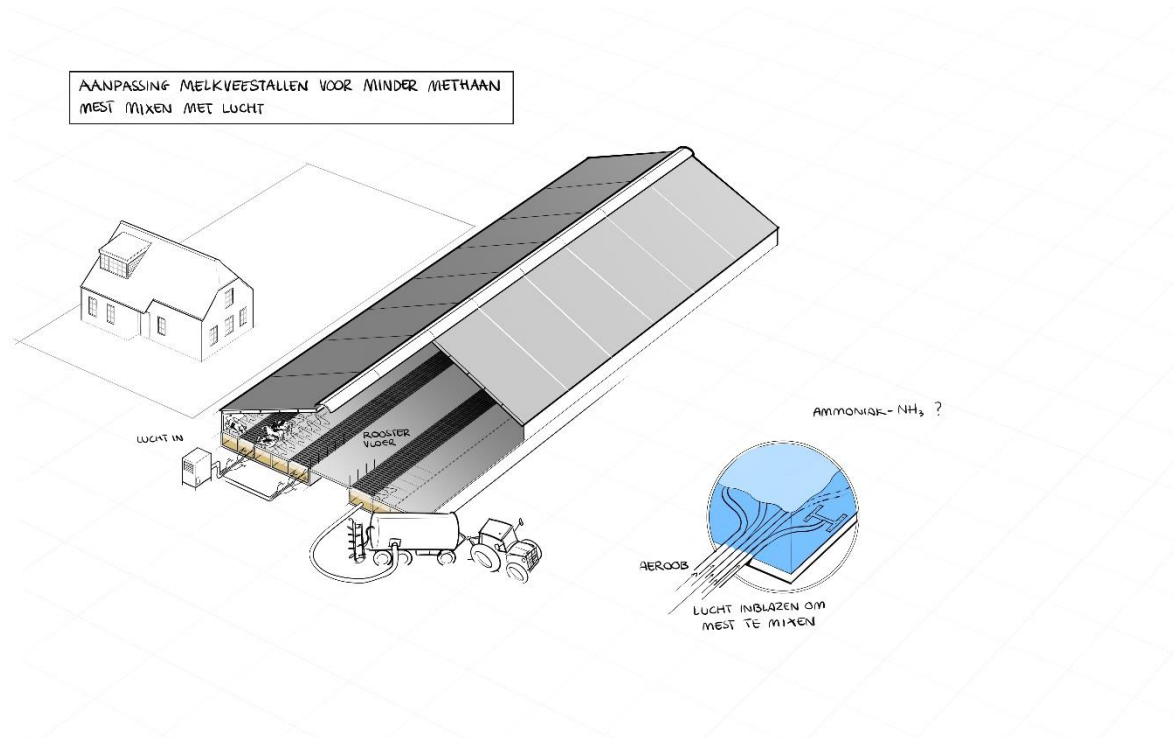
## 3.7 'Don't throw the baby out with the bathwater' – reflectie

- Bij een perfect uitgevoerde scheiding zou de methaanemissie uit de dunne fractie (urine) bijna nul kunnen zijn en zou het effect van het gecontroleerd composteren op de totale methaanemissiereductie groter kunnen worden – mits deze niet als ligboxvulling wordt gebruikt en het product zijn stabiliteit behoudt.
- Een zeer efficiënte scheidingstechniek kan ervoor zorgen dat het leeuwendeel van de koolstof in de dikke fractie terecht zal komen.

- 
- Omdat koolstof de bron is voor methanogenese, kan methaanvorming via processing hetzij voorkomen worden (compostering) of juist gecontroleerd aangejaagd worden (vergisting). Hierbij kan ook primaire scheiding (urine en feces apart opvangen en opslaan) overwogen worden.
  - Bij de huidige opstelling (met een vijzelpers) is het ook mogelijk om de dunne fractie licht aan te zuren waardoor methaanvorming in deze fractie geremd en ammoniakemissie uit deze fractie gereduceerd kan worden.
  - Een langere verblijftijd van de dikke fractie in de composteringstrommel kan zorgen voor een stabiel materiaal waaruit weinig tot geen methaan zal ontstaan. Aanvullend onderzoek kan uitwijzen hoelang die tijd moet zijn.

# 4 Mest mixen met lucht

Jan Vonk, Daniel Puente-Rodríguez, A.P. (Bram) Bos & André J.A. Aarnink



## 4.1 Principe & ervaringen

Door het beluchten van mest kan de methaanemissie (uit mest) in melkveestallen met 57% gereduceerd worden (Amon et al., 2006a; Šebek et al., 2016 en referenties daarin). Bij varkensdrijfmest wordt in de literatuur een methaanreductie van tussen de 47% en 99% gerapporteerd (Martinez et al., 2003; Thompson et al., 2004; Šebek et al., 2016 en referenties daarin). Recent onderzoek met beluchting van drijfmest van varkens bevestigde een reductie van 40% (Calvet et al., 2017).

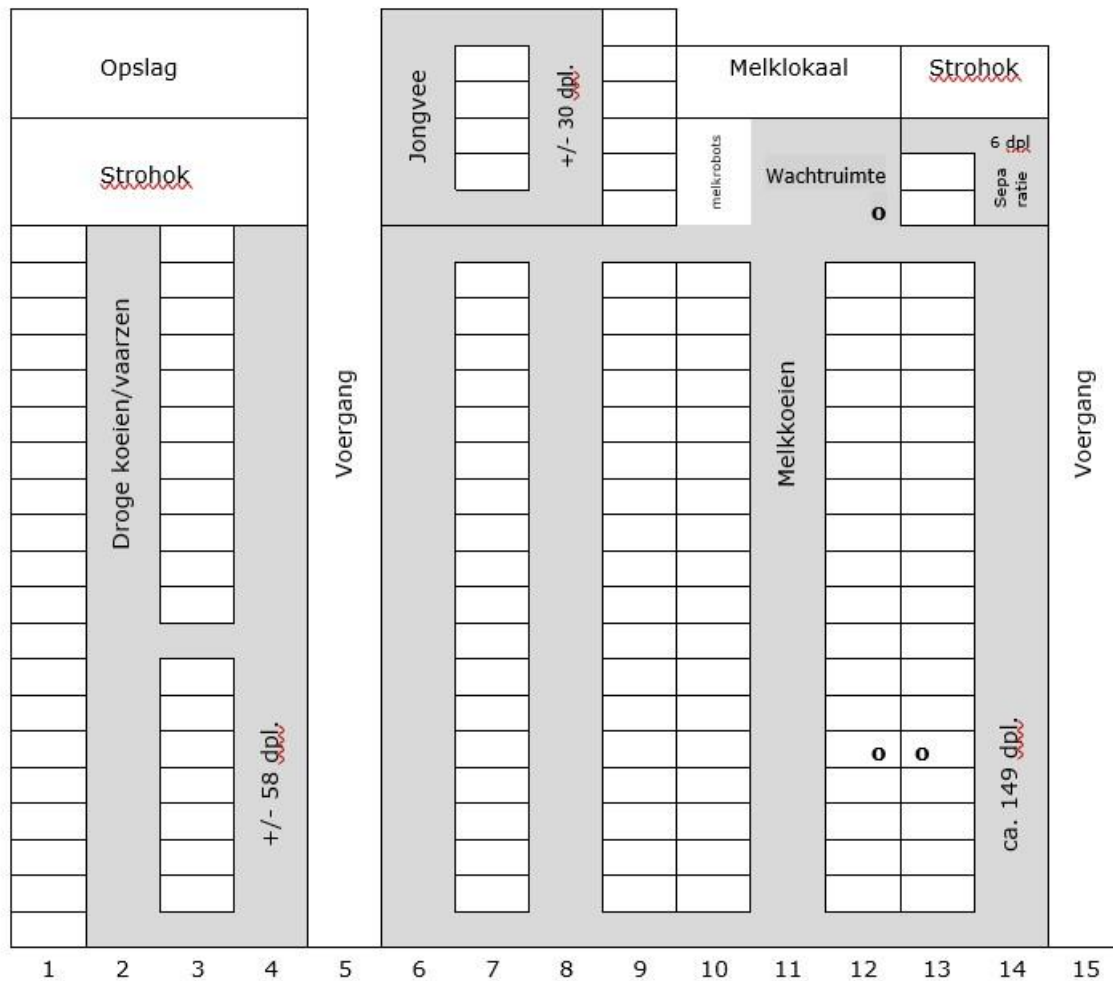
Ten aanzien van ammoniakemissie heeft recent onderzoek laten zien dat het mixen van mest (met twee luchtsystemen en een mechanische dompelmixer) in een driejarig experiment niet tot reductie van ammoniakemissie leidt (Van Dooren et al., 2019). In het verleden hadden Calvet et al. (2017) zelfs een toename van ammoniakemissie met 20% gerapporteerd. Op basis van deze data zou geconcludeerd kunnen worden dat hier aanvullende maatregelen vereist zijn t.a.v. de ammoniakemissie.

## 4.2 Systeembeschrijving

Dit onderzoek heeft plaatsgevonden op een melkveebedrijf in het veenweidegebied. Het melkveebedrijf bestaat nu niet meer. De familie die het bedrijf runde heeft haar veehouderijactiviteiten naar het buitenland verhuisd.

De melkveestal bestond uit een 'oud' en 'nieuw' gedeelte die qua bouw echter overeenkwamen en visueel/functioneel één geheel vormden.

Uitvoering was 2+5+0 rijig, waarbij het eerste gedeelte bestemd was voor droge koeien en vaarzen (Figuur 12). In het vijfrijige deel waren de melkkoeien gehuisvest, naast een jongveegeedeelte en de melkstal met een roostervloer en een drietal melkrobots. Er was tevens een mestrobot aanwezig, zonder sproeifunctie. Overdag werd geweid van ca. 06:00-16:30u, waarbij de stal toegankelijk bleef. Zie ook onderstaande schematische weergave (Figuur 12).



**Figuur 12** Schematische weergave melkveebedrijf. Grijs, mestbesmeurd oppervlak. Op de plekken aangeduid 'o' werden de luchtslangen de kelder ingevoerd.

In de schematische weergave hierboven (Figuur 12) vormen kolommen 1 t/m 9 de oude stal, met mestkelders aan beide zijden van de voergang (1,5 meter diep - inschatting melkveehouder). Het jongveegeedeelte bovenaan was apart onderkelderd. Tussen de boxenrijen waren de looppaden 2 m breed, aan het voerhek 2,5 m. De nieuwe stal (kolom 10 t/m 15) was volledig onderkelderd (2 meter diep), dus ook onder de voergang. Als het mestniveau in de kelder onder kolommen 6 t/m 9 te hoog werd, kon deze overlopen naar het nieuwe deel. Het looppad tussen de boxenrijen was hier ca. 5 m breed, aan het voerhek 4,5 m.





De stal was natuurlijk geventileerd met windbreekgaas en stuurbare gordijnen aan beide lange kanten, en bevatte twee open nokken.

Bij de uitbreiding van de stal, was in het nieuwbouwgedeelte het Aeromix-systeem in de kelders ingebouwd. Een compressor in de technische ruimte boven de melkrobots perste lucht door slangen naar punten die om de twee meter in de kelder zaten. Daar werden bellen gevormd die door de werking van een speciaal klepje boven op het uitlaatpunt op weg naar boven langzaam de vorm van een paddenstoel kregen. Daarmee werd de mest gemixt en deels belucht. Er waren 3 secties met ieder 20 slangen (punten waarop deze de kelder ingaan worden in de schets met vetgedrukte o-tjes aangegeven). In de put splitste elke slang in vieren, zodat er in totaal dus 240 uitlaatpunten waren. Er werd tweemaal daags gemixt, waarbij iedere slang opeenvolgend gedurende 4,5 minuut aangestuurd werd. Dat betekent dat het systeem ca. 9 uur per dag in bedrijf was (van ca. 9:30-14:00u en 22:00-02:30u). Er werd ongeveer 720 m<sup>3</sup> lucht per dag ingebracht. Het advies van de leverancier van het systeem is dat de mesthoogte minimaal 40 cm moet zijn om te kunnen mixen. Echter in dit bedrijf werd 80 cm gehanteerd. Het systeem stond daarom in het voor- en najaar een tijdje uit.



Op het bedrijf was het mogelijk om een praktijkproef te houden, omdat in dezelfde ruimte één productiegroep gehouden werd met daaronder (van elkaar gescheiden) kelders mét en zonder het Aeromix-systeem. Er is zoals gezegd wel een verschil in de diepte van die kelders (1,5 en 2 m), tevens verschilt de spleetbreedte van de roosters. In het oude deel was dit ca. 4,5 cm en in het nieuwe 3,5 cm, waarbij het in het nieuwe deel bovendien niet mogelijk was roosters te verwijderen (in specie gezet). Daardoor kon daar de normale statische box (Lindvalldoos) in ieder geval niet toegepast worden, en de eerste uitvoering van de paraplumethode ook niet (zie hoofdstuk 2). Daarom is een nieuw ontwerp van de meetparaplu gemaakt die langs kleine spleten gemanoeuvreed kan worden.

Het doel van dit onderzoek was om het effect van een beluchting mestmixsysteem met lucht (Aeromix) op de methaan-, lachgas- en ammoniakemissie uit een mestkelder te bepalen in vergelijking met de emissies uit een vergelijkbare 'control' mestkelder.

### 4.3 Methodologische aanpak

Het onderzoek werd uitgevoerd op 1 melkveebedrijf. Om de reductie van de emissie van een bepaalde techniek of maatregel te bepalen, is een goede referentie (control) noodzakelijk, waarbij alle omstandigheden gelijk zijn, behalve de toegepaste maatregel of techniek. Alleen op die manier kunnen we een zinvolle uitspraak doen over het reducerende effect van de maatregel.

In het geval van dit melkveebedrijf waren er twee onafhankelijk van elkaar te bemeten mestkelders in één stal. Zolang de samenstelling van de mest in die kelders gelijk was (bij vergelijkbare koeien met vergelijkbaar voer op de roosters boven die plekken), evenals de 'leeftijd' van de mest en het mestpeil, konden hier goede case-control metingen op kelderniveau worden uitgevoerd. Verwacht mocht worden dat dit het geval was, er was sprake van één productiegroep en aan beide zijden wordt gevoerd. Wel was het zo dat alle krachtvoer aan de nieuwe kant gegeven wordt (melkrobots/krachtvoerboxen). Mogelijk verbleven de dieren daardoor vaker aan die kant waardoor mestproductie daar hoger zal zijn. Daar tegenover staat echter ook een groter loop- en daarmee kelderoppervlak, plus een grotere diepte. Theoretisch gezien zou de verhouding afgesloten vs. open kelder eveneens van invloed kunnen zijn, maar door de onderkelderde voergang in het nieuwe gedeelte was deze alsnog vergelijkbaar.

In dit onderzoek zijn lab analyses uitgevoerd om het Biochemisch Methaan Potentieel (BMP) en de actuele methaanproductie (AMP) vast te stellen. Ook werden er de emissies van de broeikasgassen methaan en lachgas en van ammoniak uit de mest gemeten.

### 4.3.1 Lab analyses

Op de eerste meetdag (09-12-2020) werden monsters van de met lucht gemixte en referentie mestkelders genomen voor het vaststellen van BMP en AMP. In dit rapport nemen we de beschrijving van de methode en de resultaten zoals aangeleverd door LeAF (Schuman & Hulsman, 2021) bijna letterlijk over, tekstuele aanpassingen en beschouwingen zijn toegevoegd voor de leesbaarheid en de duiding van de resultaten.

#### Materialen en methode

De monsters werden gebruikt zoals aangeleverd na monsternamen. Gedurende de tijd tussen aanlevering en het inzetten van de test werden de BMP monsters opgeslagen bij 4 °C en de AMP-monsters werden overnacht opgeslagen bij de incubatietemperatuur (10 °C), gelijk aan de condities tijdens de monsternamen. Een karakterisering van het materiaal werd uitgevoerd op basis van de volgende parameters: droge stof- en organische stofgehalte, pH en vluchtige vetzuren. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 12.

**Tabel 12** Resultaten van de karakterisering van de monsters aangeleverd op 09-12-2020.

|                      |         | drijfmest referentie | drijfmest gemixt d.m.v. lucht |
|----------------------|---------|----------------------|-------------------------------|
| pH                   | -       | 7,0                  | 7,1                           |
| Droge stof (DS)      | g/kg    | 93,1                 | 89,6                          |
| Organische stof (OS) | g/kg    | 71,0                 | 69,6                          |
| % OS van DS          | -       | 76                   | 78                            |
| Vluchtige vetzuren   | mgCZV/l | 9986±32              | 10619±106                     |
| Acetaat              | mg/l    | 5472±23              | 5809±73                       |
| Propionaat           | mg/l    | 1636±12              | 1649±20                       |
| Butyraat             | mg/l    | 542±3                | 680±5                         |
| Valeraat             | mg/l    | 337±7                | 338±5                         |

#### Anaerobe afbreekbaarheidstest

De testen voor de bepaling van het biogaspotentieel werden uitgevoerd in 1-literflessen met een totaal vloeistof volume van 200 ml. Als entmateriaal werd digestaat van RWZI Ede gebruikt. Een controle test met alleen ent werd uitgevoerd om te kunnen corrigeren voor endogene biogasproductie uit het entmateriaal. Aan alle flessen werden macronutriënten, sporenelementen en een fosfaatbuffer (pH 7) toegevoegd. De testen zijn uitgevoerd bij 35 °C onder continue menging op een schudbak (100 rpm). Voor aanvang van de testen werd de gasfase van alle flessen vervangen door stikstofgas. Gedurende de test werd de gasproductie regelmatig gevolgd met behulp van een drukmeetsysteem. Aan het eind van de test werd de biogassamenstelling geanalyseerd. De testperiode was 37 dagen.

#### AMP

De AMP-bepaling werd uitgevoerd volgens het protocol dat binnen het EU-project M4Models is ontwikkeld. Met de ongezeefde monsters werd de methaanproductie gemeten, zowel na 1 dag (test uitgevoerd in 6-voud), als na 7 dagen (test uitgevoerd in 3-voud). De incubatietemperatuur was 10 °C.

#### Analyses

pH: De pH werd gemeten met een dagelijks gekalibreerde pH-elektrode.

---

Vluchtige vetzuren: Het gehalte aan vluchtige vetzuren van de opgeloste fractie werd gaschromatografisch bepaald. De voorbereiding van de monsters bestond uit verdunnen van het substraat, tien minuten centrifugeren bij 10.000 rpm, en verdunning van het supernatant met 3% mierenzuur. Deze analyse betreft vluchtige vetzuren met een ketenlengte van 2 t/m 5 koolstofatomen (azijnzuur, propionzuur, boterzuur en valeriaanzuur). De detectielimiet was voor elk vetzuur 20 mg/l.

Gasproductie en -samenstelling: Het volume geproduceerd biogas werd bepaald met behulp van een drukmeetsysteem. De gehalten methaan en koolstofdioxide in het biogas werden gaschromatografisch bepaald.

Droge en organische stofgehalte: Het gehalte droge stof en organische stof werd bepaald volgens de standaardmethode, met droging van de monsters bij 105 °C en verassing bij 550 °C.

### 4.3.2 Broeikasgas- en ammoniakemissiemetingen

De metingen werden uitgevoerd met de statische paraplumethode zoals beschreven in paragraaf 2.3, waarbij vanwege de smalle roosterspleten een kleinere paraplu werd gebruikt. Per meetdag werden zes metingen uitgevoerd in het beluchte gedeelte, en zes in het referentiedeel. Deze waren gelijkelijk verdeeld over de lengte van de stal en de looppaden aan de voergangen en tussen de ligboxen (kolommen 11 en 14 resp. 6 en 8 voor case en control in Figuur 12). Er werd tevens een meting uitgevoerd in de wachtruimte, welke bij het berekenen van gemiddeldes buiten beschouwing is gelaten vanwege mogelijke verdunning door water voor de reiniging.

Data werd geanalyseerd met de bij de FTIR-monitor horende applicatie Calcmet (versie 12.202, Gasmet Technologies Oy). In de software worden zo nodig compensaties uitgevoerd voor andere componenten dan de te analyseren gassen. Naast water (standaard) werd in de analyse gecompenseerd voor de belangrijkste niet-methaan vluchtige organische stoffen (propan-1-ol, ethylacetaat, isopropanol, acetaldehyde en n-propylacetaat), ethanol en vluchtige vetzuren (azijnzuur en boterzuur). Het resultaat daarvan is een outputfile met de concentraties per tijdvak van 20 seconden. Begin en eind van een meting werden uit de aantekeningen gedurende meetdagen gehaald, en geverifieerd door de data te plotten. Daarmee was ook een visuele inspectie van de data mogelijk, bijvoorbeeld of er reden is te veronderstellen dat de paraplu niet goed geplaatst was en er daardoor mogelijk uitwisseling met de lucht in de kelder was.

Om de emissies te berekenen werd de formule uit paragraaf 2.3 toegepast, met dien verstande dat inhoud van de paraplu hier 0,0105 m<sup>3</sup> bedroeg en bemeten oppervlak 0,0954 m<sup>2</sup> groot was.

Hoewel met de FTIR-techniek op deze wijze (fundamenteel) onderzoek mogelijk is naar emissiepatronen van veel verschillende gassen en componenten die hierbij een rol spelen, zijn in deze verkennende studie behalve CH<sub>4</sub> alleen NH<sub>3</sub> en N<sub>2</sub>O betrokken. Bij de beoordeling van stijglijnen werd mede gekeken naar CO<sub>2</sub>, maar hier niet gerapporteerd omdat dit deel uitmaakt van de zogenaamde korte kringloop.

## 4.4 Resultaten

### 4.4.1 Lab analyses

#### **Resultaten AMP**

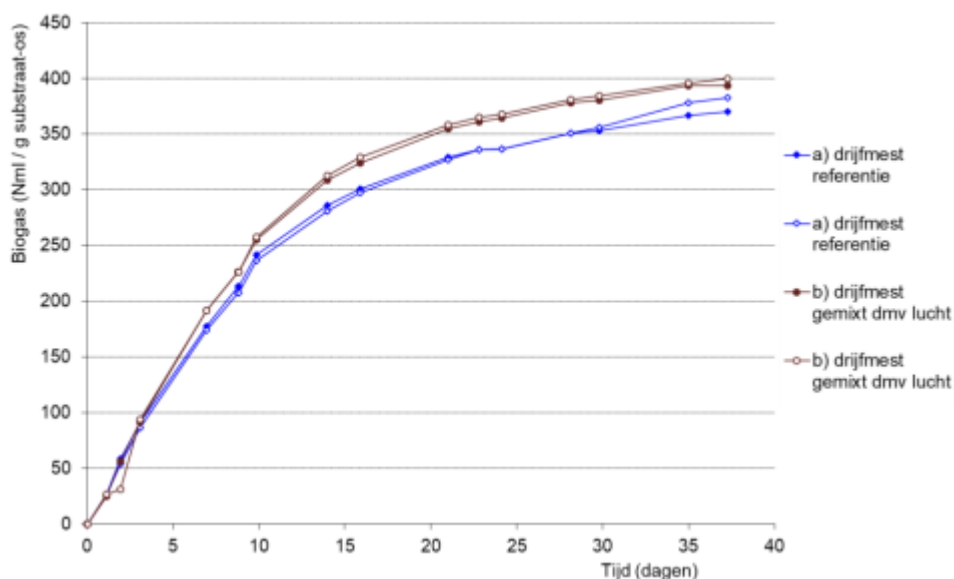
In Tabel 13 staan de gemiddelde waarden voor de methaanproductiesnelheid weergegeven, en de methaangehaltes in de testtubes aan het eind van de test. In monster drijfmest gemixt d.m.v. lucht is het methaangehalte na 24 uur vergelijkbaar met die van de blanco/controle. Er is in deze test dus geen methaanproductie waargenomen binnen 24 uur. In het andere monster is wel enige methaanproductie waargenomen binnen 24 uur.

**Tabel 13** Samenvatting van de AMP-testresultaten (bij 10 °C).

| Monster                       | testperiode |      | CH <sub>4</sub> productiesnelheid (g CH <sub>4</sub> /kg OS-monster/d) |       | gassamenstelling aan het eind van de test (ppm CH <sub>4</sub> in buis) |       |
|-------------------------------|-------------|------|--|-------|---|-------|
|                               | uur         | dag  | gemid.   | stdev | gemid.  | stdev |
| drijfmest referentie          | 23          | 0,94 | 0,05 (n=6)   | 0,01  | 1219  | 55    |
| drijfmest referentie          | 166         | 6,92 | 0,08 (n=3)   | 0,00  | 8464  | 852   |
| drijfmest gemixt d.m.v. lucht | 21          | 0,88 | 0,0 (n=6)  | 0,0   | 656   | 96    |
| drijfmest gemixt d.m.v. lucht | 165         | 6,86 | 0,06 (n=3)   | 0,00  | 5708  | 313   |

### Resultaten BMP

In onderstaande figuur (Figuur 13) wordt het verloop van de biogasproductie uit de monsters weergegeven in Nml biogas per g substraat-OS. In Tabel 14 staan daarnaast ook de gemiddelde waarden voor de biogasproductie weergegeven in m<sup>3</sup> per ton substraat, en het methaangehalte van het biogas. Alle getallen zijn gecorrigeerd voor de gasproductie uit de blanco met alleen entmateriaal.



**Figuur 13** Biogasproductie in Nml biogas/g substraat-OS.

**Tabel 14** Samenvatting van de testresultaten (duplobepaling).

| Monster                       | Biogasproductie                     |                                  | CH <sub>4</sub> gehalte in het biogas (%) |
|-------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---|
|                               | (Nm <sup>3</sup> /ton substraat-OS) | (Nm <sup>3</sup> /ton substraat) |   |
| drijfmest referentie          | 376 ± 7                             | 26,7 ± 0,5                       | 66  |
| drijfmest gemixt d.m.v. lucht | 396 ± 3                             | 27,6 ± 0,2                       | 65  |

Deze testen zijn uitgevoerd bij 35 °C onder standaard (ideale) laboratoriumcondities met een niet-geadapteerd inoculum. De verkregen resultaten geven dan ook het maximale biogaspotentieel onder deze standaardcondities. Afhankelijk van de toegepaste procescondities kan de biogasopbrengst in de praktijk zowel hoger als lager uitvallen.

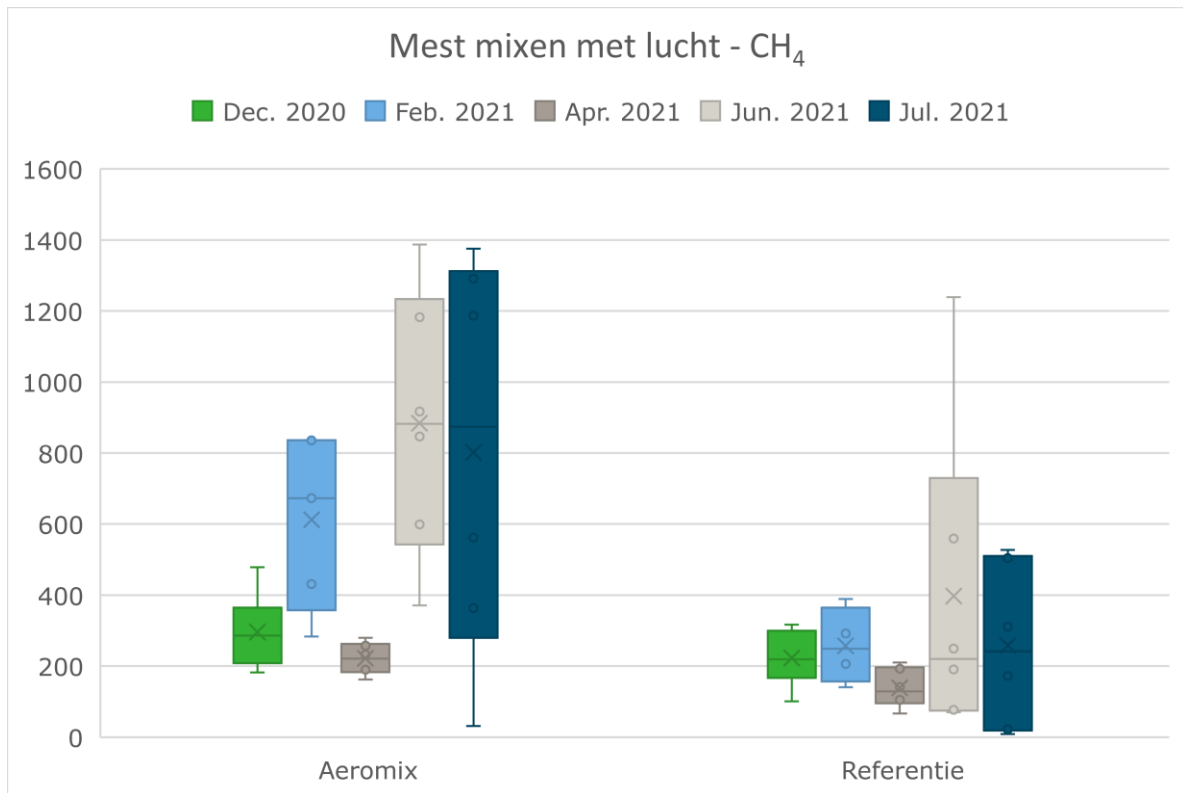
#### 4.4.2 Emissie metingen

De veehouder heeft het melkveebedrijf in Nederland beëindigd en is een nieuw bedrijf in het buitenland gestart. Hierdoor was het niet mogelijk jaarrond te meten. Er konden vijf meetdagen worden gehouden, waarbij de laatste (14-07-2021) een maand vervroegd werd. Op deze wijze kon er op twee dagen in de zomer, twee in de winter en één in het voorjaar gemeten worden. Van de metingen op de tweede meetdag werden er drie (twee bij de referentie en één bij de case) buiten beschouwing gelaten vanwege problemen met de meetparaplu. Resultaten zijn cijfermatig samengevat in Tabel 15 en voor CH<sub>4</sub> grafisch in Figuur 44.

**Tabel 15** Samenvatting van emissies (medianen in mg/m<sup>2</sup>/u) en het verschil (%) tussen control en case mestkelders voor CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub> en N<sub>2</sub>O. Buitentemperatuur op basis van daggemiddelde KNMI-station Schiphol.

| Datum                | CH <sub>4</sub> control<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | CH <sub>4</sub> case<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | Vershil<br>CH <sub>4</sub> (%) | NH <sub>3</sub> control<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | NH <sub>3</sub> case<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | Vershil<br>NH <sub>3</sub> (%) | N <sub>2</sub> O control<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | N <sub>2</sub> O case<br>(mg/m <sup>2</sup> /u) | Vershil<br>N <sub>2</sub> O (%) | T buiten<br>(°C) |
|----------------------|---|--|--------------------------------|---|--|--------------------------------|--|---|---------------------------------|------------------|
| 09-12-2020           | 219   | 286  | 31                             | 12,6  | 19,3   | 53                             | 0,07   | 0,09  | 21                              | 1,1              |
| 03-02-2021           | 249   | 673  | 170                            | 50,6  | 36,1   | -29                            | 0,12   | 0,03  | -72                             | 8,2              |
| 07-04-2021           | 129   | 221  | 71                             | 19,8  | 19,6   | -1                             | 0,06   | 0,11  | 80                              | 3,8              |
| 02-06-2021           | 220   | 882  | 301                            | 80,4  | 44,1   | -45                            | 0,08   | 0,02  | -80                             | 20,7             |
| 14-07-2021           | 242   | 874  | 262                            | 26,6  | 83,5   | 214                            | 0,13   | 0,04  | -66                             | 17,9             |
| <b>Gem.<br/>± SD</b> | <b>212 ± 48,1</b>                                 | <b>587 ± 317</b>                               | <b>167*</b>                    | <b>38,0 ±<br/>27,7</b>                            | <b>40,5 +<br/>26,3</b>                         | <b>7</b>                       | <b>0,09 +<br/>0,03</b>                             | <b>0,06 ±<br/>0,04</b>                          | <b>-38</b>                      | <b>10,3</b>      |

\* Significant ( $p < 0,05$ ) verschil tussen case en control, op basis van eenzijdige t-test.



**Figuur 44** Boxplot case-control metingen mixen met lucht. Y-as emissies in  $\text{mg/m}^2/\text{u CH}_4$ .

Gemiddeld lag de methaanemissie uit mest voor de met lucht gemixte kelder op alle meetdagen hoger dan de referentie. Toetsing van de mediane waarden over de meetdagen met een éézijdige t-test levert dan ook een significant verschil op (P-waarde 0,021). De variatie in de resultaten is met name in de zomer echter groot, en lijkt voor het met lucht gemixte gedeelte ook groter te zijn. Voor  $\text{NH}_3$  verschilt het beeld tussen meetdagen, echter gemiddeld genomen is de emissie vergelijkbaar.

## 4.5 Conclusie en reflectie

De hier gepresenteerde resultaten van emissiemetingen zijn indicatief. Het principe van de boxmeting is weliswaar gevalideerd (Mosquera et al., 2010), maar niet in samenhang met een meetparaplu welke uit andere materialen bestaat. Mogelijk spelen absorptie- en desorptieprocessen een rol, en er kan een groter risico op lekkage/variatie in luchtvolume zijn. Dit doordat de correcte plaatsing van bovenaf door de roosters beoordeeld moet worden. Vanwege de case-control opzet mag echter worden aangenomen dat hierbij voor beide kelders vergelijkbare fouten werden gemaakt.

Dit systeem wordt voornamelijk gecommmercialiseerd voor het mixen van mest en om de homogeniteit en verpompaarheid van mest te verbeteren. De veehouder van het melkveebedrijf waar dit onderzoek werd uitgevoerd was positief wat betreft de mogelijkheden van dit systeem om deze functie uit te voeren en over het daadwerkelijke resultaat.

Methaanproductie is een anaeroob proces. Echter, mest mixen door middel van lucht is niet hetzelfde als het beluchten van mest. De resultaten laten een hogere methaanemissie op alle meetdagen in de met lucht gemixte mestkelder zien. Aanvullend onderzoek zou uitgevoerd moeten worden om erachter te komen of mest mixen door middel van lucht inderdaad een negatief effect op de methaanemissie heeft – hierbij zou rekening gehouden moeten worden met mogelijk verschillende uitvoeringen van het systeem. Omdat methaanemissie processen anaeroob zijn zou het daadwerkelijk aerob maken van mest in theorie positieve effecten kunnen hebben. Zo wordt bijvoorbeeld in de waterzuivering nu al met micro-beluchting gewerkt.

Hierbij wordt zuurstof ingebracht t.b.v. aerobe biologische afbraak van organische stoffen. Dit zou leiden tot positieve effecten in de reductie van de methaanemissie maar ook tot N<sub>2</sub>O emissies. Ook in de literatuur wordt gerapporteerd over het behalen van een methaanemissiereductie in experimenten met kleine hoeveelheden mest onder gecontroleerde omstandigheden. Zo rapporteerden Amon et al. (2006a) dat bij het inbrengen van tussen 1 en 3 m<sup>3</sup> verse lucht per m<sup>3</sup> drijfmest per dag in een vat met 10 m<sup>3</sup> drijfmest resulteerde in een methaanemissiereductie ten opzichte van het controle vat. Calvet et al. (2017) deden een wat kleinschaliger experiment met mesttanks met 1 m<sup>3</sup> mest. In elke mesttank werd om de 6 uur 170 L min<sup>-1</sup> verse lucht gedurende 2 minuten geïnjecteerd, dus ruim 1 m<sup>3</sup> lucht per m<sup>3</sup> drijfmest per dag. Bij het bedrijf waar het onderhavige onderzoek werd uitgevoerd werd ingeschat dat er 80 m<sup>3</sup>/uur werd ingebracht (informatie afkomstig van de leverancier). Als het systeem vervolgens twee keer per dag 4,5 uur actief was, dan zou dit betekenen dat er 720 m<sup>3</sup> lucht per dag werd ingebracht. Dit gebeurde alleen als de mesthoogte minimaal 80 cm was, waardoor in het voor- en najaar het systeem een tijdje niet werd gebruikt. Bij een mesthoogte van 80 cm bevindt zich in dit bedrijf circa 740 m<sup>3</sup> drijfmest in de mestkelder. Zelfs in het gunstigste geval was de ingebrachte hoeveelheid lucht met circa 0,1 m<sup>3</sup> lucht/m<sup>3</sup> mest dus relatief klein in vergelijking tot de literatuur. Daarbij werd ook bewust getracht de luchtbellens zo groot mogelijk te maken. Het bestudeerde systeem op dit bedrijf lijkt dus – ook met alle methodologische voorbehouden – onvoldoende effectief om de methaanemissie uit mest te reduceren. Mogelijk dat het veel intensiever en verspreider inbrengen van lucht in de mest in praktijkomstandigheden betere resultaten kan opleveren, maar dit gaat mogelijk ten koste van het mechanische mengeffect van de luchtbellens.

Dat er geen noemenswaardig effect ten aanzien van de ammoniakemissiereductie werd waargenomen is consistent met de laatste inzichten in de wetenschappelijke literatuur (Van Dooren et al. 2019). Daarom zou bij het door ontwikkelen van 'mest beluchten' als methaanemissie reducerende maatregel aanvullende maatregelen genomen/gecombineerd moeten worden voor het reduceren van de ammoniakemissie.

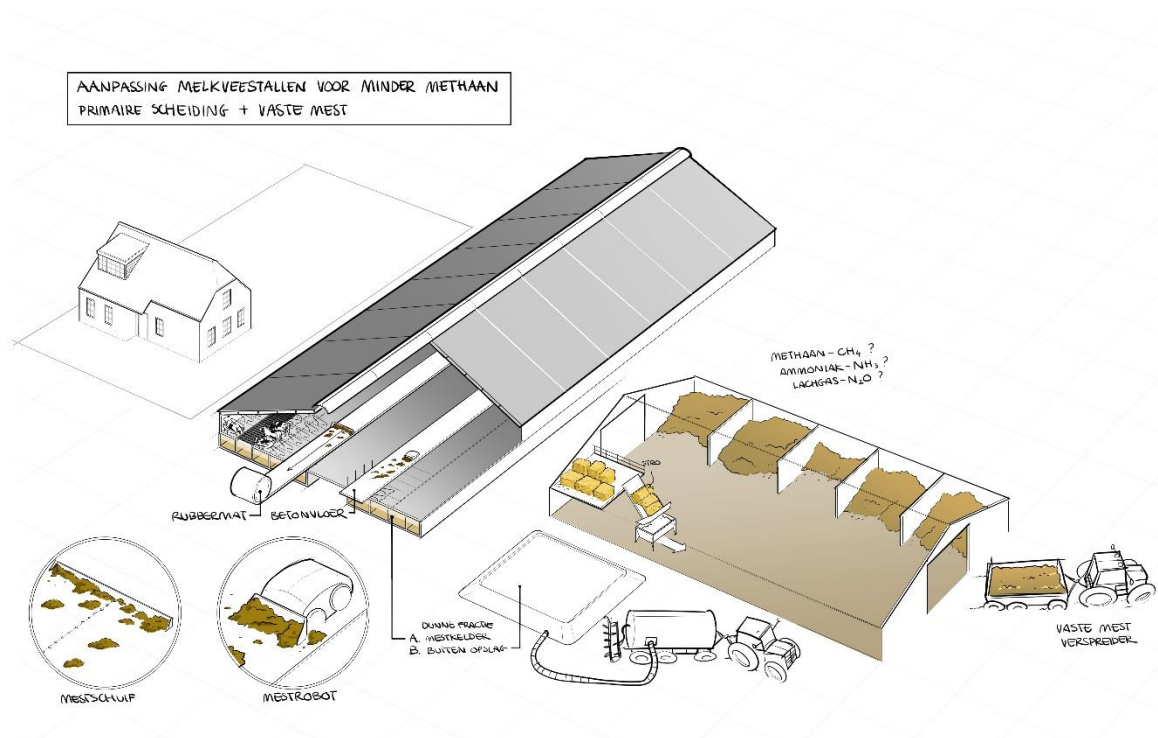
In de volgende tabel worden de waargenomen emissiewaardes naar algemeen gebruikte eenheden omgerekend. Zoals eerder gemeld zijn er veel factoren die het moeilijk/onmogelijk maken om harde conclusies te trekken aan de hand van de uitgevoerde indicatieve metingen.

**Tabel 16** Indicatieve omrekening van waargenomen methaanemissies (kg CH<sub>4</sub>/dierplaats/jaar) en ammoniakemissies (kg NH<sub>3</sub>/dierplaats/jaar) uit mest en door de Emissieregistratie en in de Rav gehanteerde waarden (kg CH<sub>4</sub>/melkkoe/jaar en NH<sub>3</sub>/melkkoe/jaar. Let wel op bij de Emissieregistratie, dit is per melkkoe i.p.v. per dierplaats). Voor ammoniak is 25 – 40 % (Van Dooren et al., 2019) aangenomen als bijdrage van de kelderemissie aan de totale emissie.

| Emissies                       | Mest gemixt met lucht          | Referentie                     | Emissieregistratie/Rav                                   |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|
| <b>CH<sub>4</sub> uit mest</b> | 53,4 CH <sub>4</sub> /dpl/jr   | 12,5 CH <sub>4</sub> /dpl/jr   | 37,6 CH <sub>4</sub> /mk/jr                              |
| <b>NH<sub>3</sub> uit mest</b> | 3,7 kg NH <sub>3</sub> /dpl/jr | 2,2 kg NH <sub>3</sub> /dpl/jr | 3,3 (25%) - 5,2 (40% van 13,0) kg NH <sub>3</sub> /mk/jr |

# 5 Primaire scheiding + vaste mest

Daniel Puente-Rodríguez, Jan Vonk, A.P. (Bram) Bos & André J.A. Aarnink



## 5.1 Principe & ervaringen

Naast eisen en wensen ten aanzien van klimaatverandering en dus de behoefte aan de reductie van broeikasgasemissies, zijn er andere trends en aspecten van belang voor de verduurzaming van de melkveehouderij. Natuurinclusieve en kringlooplandbouw zijn twee concepten die momenteel een belangrijke rol spelen. Vaste mest wordt vanuit deze invalshoek gezien als een belangrijk element voor het aanvoeren van mineralen en organische stof (OS) naar de bodem. De aanvoer van OS kan bijdragen aan het herstellen van de bodemvruchtbaarheid en het waterbergende en -leverende vermogen.

Het bedrijf waar de metingen zijn uitgevoerd is de melkveestal van de familie Sprangers in Kaatsheuvel die is gebouwd volgens het Kwatrijn stalconcept ([www.kwatrijn.com](http://www.kwatrijn.com)). In een ander document zijn een aantal aspecten samengevat die de Kwatrijnstal binnen de kringlooptransitie positioneert (Puente-Rodríguez et al., 2021). Deze argumenten zijn (deels) ook van toepassing op andere melkveebedrijven die met vaste mest werken (Ibid.):

- Hoog dierenwelzijn: bijv. vanwege 12 m<sup>2</sup> staloppervlak per koe i.c.m. ligbox eilanden (geen scheiding/muren tussen gangen) waardoor koeien vluchtgedrag kunnen vertonen.
- Elektriciteitsneutraal.
- Primaire scheiding van mest in een nitraat-rijke dunne fractie die als kunstmestvervanger ingezet kan worden en een fosfaat- en OS rijke dikke fractie voor bemesting en bodemverbetering.
- Vaste mest (= dikke fractie + stro) wordt gebruikt vanwege de ervaren goede zorg voor de bodem (voeding, bodemleven, OS en waterleverend en -conserverend vermogen) (Schoumans et al., 2019).
- Primaire scheiding en apart opslaan van dikke fractie en urine kan voor minder ammoniakemissie zorgen.



Deru et al. (2018) rapporteerden op basis van verkennende metingen van het Louis Bolk Instituut rond 50% emissiereductie t.o.v. traditionele roostervloer. Principes zoals urine gescheiden houden van de feces kunnen werken om emissies te beperken (Vaddella et al., 2010), omdat ammoniak ontstaat als het enzym urease dat o.a. voorkomt in de feces in contact komt met het ureum in de urine. Het is daarom heel belangrijk dat urine zo frequent mogelijk wordt afgevoerd en zo min mogelijk urine en vaste mest achterblijft op de stalvloer. De primair gescheiden vloeibare fractie bevat vooral stikstof en kalium en kan worden gebruikt voor het bemesten van grasland in het groeiseizoen, terwijl de vaste mest rijk is aan fosfaat en organische stof en kan worden gebruikt voor de bemesting van akkers en voor bodembeheer/herstel. Deze praktijk zal naar verwachting het gebruik van nutriënten verbeteren en de vervanging van synthetisch gemaakte meststoffen vergemakkelijken (De Vries et al., 2015; Van Middelkoop & Holshof, 2017). Dat is belangrijk omdat de voorraden gemijnd steenfosfaat eindig zijn (Dawson & Hilton, 2011; Geissler et al., 2018) en dat de productie van stikstofkunstmest zeer energie-intensief is (Dawson & Hilton, 2011; Trimmer & Guest, 2018) en op dit moment gepaard gaat met een forse CO<sub>2</sub>-uitstoot.

- Goede landschappelijke inpassing (Vista, 2012).
- Open karakter, weinig muren, wandelaars of bezoekers kunnen altijd naar binnen kijken. Transparante melkveehouderij.
- Maatschappelijke verbinding onder andere d.m.v. actieve deelneming aan Duinboeren ([www.duinboeren.nl/](http://www.duinboeren.nl/)) dat samen met omwonenden vormgeeft aan het platteland.
- Natuurbeheer op pachtgronden van Natuurmonumenten. Het bedrijf staat naast het Nationaal Park De Loonse en Drunense Duinen (Natura 2000).
- Biologische productiewijze.
- Extensieve melkveehouderij. De koeien zijn 5 maanden op stal en beschikken de rest van het jaar over 90 ha grasland. In het voor- en naseizoen wordt alleen overdag geweid, in de zomer dag en nacht en zo lang als mogelijk.
- Er wordt voor zover mogelijk gebruik gemaakt van voer van eigen grond.

De focus in dit hoofdstuk is het principe 'primaire mestscheiding i.c.m. vaste mest'. Hier is dus sprake van een andere situatie dan alleen scheiding, waarbij een dunne en dikke fractie ontstaat. In dit geval is de gehele bedrijfsvoering anders, met een focus op de productie en gebruik van vaste mest anders dan de gebruikelijke potstal. Onze interesse is om het effect van deze wijze van primaire mestscheiding i.c.m. de opslag van de dikke fractie in de vorm van vaste mest op de emissie van methaan, lachgas en ammoniak te meten. De hypothese was dat primaire mestscheiding zowel een reductie van de methaanemissie als van de ammoniakemissie zou kunnen opleveren, met de kanttekening dat daarbij het risico op een verhoogde lachgasemissie bestaat, die de winst qua BKG-emissies weer teniet zou kunnen doen.

Het doel van dit onderzoek was om over een periode van een jaar periodiek de emissies van methaan, lachgas en ammoniak op een aantal onderdelen van dit systeem te bemeten en een inschatting te geven van de emissie van zulke systemen en van de verdeling van emissies tussen de verschillende meststromen.

## 5.2 Systeembeschrijving – Het Kwatrijn



De melkveestal van de fam. Sprangers in Kaatsheuvel huisvest circa 70 Jerseykoeien en jongvee op biologische wijze. Het jongveegeedeelte is uitgevoerd als potstal. In de stal zijn vier 'eilanden' met 18 ligboxen aanwezig die met een automatisch verdeelsysteem van (gehakseld) stro worden voorzien. Aan beide kanten ligt een voergang en in het midden een loopgang, feitelijk een 0+4+0 systeem dus. Gangen en doorsteken zijn voorzien van een beton Swaans G2 vloer waarin urine-afvoergaten van ongeveer 3 cm zijn aangebracht. De dunne fractie (urine vervuild met feces, stro en voerresten) loopt hierlangs naar een ondiepe (40 cm) kelder onder de vloer. Deze ondiepe kelder loopt over via een opvangbak naar een diepe mestkelder voor de dunne fractie met capaciteit van ca. 200 m<sup>3</sup>.



De opslagcapaciteit van de urinekelder is voldoende voor ongeveer de helft van het stalseizoen, tussentijds wordt gier naar een andere bedrijfslocatie getransporteerd. De diepe kelder bestaat uit twee gangen, die alleen aan de voorzijde met elkaar in verbinding staan en hier bevindt zich ook het afzuigpunt (in de vloer op ca. 1 m uit de muur geplaatst). Om te mixen wordt door de loonwerker mest weggezogen en via twee verticaal geplaatste buizen teruggebracht in beide keldergedeeltes. Deze bevinden zich boven het mestoppervlak en dienen tevens als ontluchters.

Een mestrobot schuift de vaste mest naar een transportband aan het eind van de stal, die deze afvoert naar de inpannige opslag. Daar wordt deze naar behoefte verder gestapeld met de voorlader. De vaste mest bevat in het Kwatrijn ongeveer 15 tot 18% droge stof. Dit moet verhoogd worden om een beter stapelbaar product te krijgen. Momenteel wordt er 6-7 kg stro per koe per dag gebruikt. Uit de vaste mest komt mestvocht die via een afvoer naar de kelder voor de dunne fractie wordt afgevoerd.

De mest wordt op het eigen bedrijf aangewend, in het voorjaar en na de eerste snede. Eind juni/begin juli zijn de opslagen dus leeg. Hierbij werd zoals vermeld weidegang gemaximaliseerd, en twee keer per dag gemolken.

## 5.3 Methodologische aanpak

Het onderzoek werd uitgevoerd op een enkel melkveebedrijf. In dit geval moet daarbij tevens rekening gehouden worden met het feit dat de veestapel uit Jerseys bestaat, met afwijkende fysiologische eigenschappen en productiekenmerken. Om iets over het reductiepotentieel te zeggen zal moeten worden teruggevallen op de literatuur en elders gemeten emissies. In die gevallen gaat het meestal om een meer reguliere bedrijfsvoering en vrijwel zonder uitzondering een ander ras koeien. Daarmee is het onderzoek bij voorbaat verkennend van aard.

### 5.3.1 Broeikasgassen en ammoniak

De emissies van broeikasgassen en ammoniak werden bepaald volgens de statische boxmethode (Mosquera et al., 2010), in combinatie met een FTIR monitor (type DX-4000, Gasmeter Technologies Oy, Helsinki Finland). Hierbij werd anders dan bij in voorgaande hoofdstukken beschreven situaties geen gebruik gemaakt van de meetparaplu, maar een Lindvall-doos. De vers aangevoerde mest onder de transportband en boven de afvoerbuizen van mestvocht werd bemeten. Afhankelijk van het volume vaste mest in de opslag werden daarnaast op meer of minder plekken op de mesthoop metingen uitgevoerd. De opslagruimte voor vaste mest is ca. 13 x 17 m, in totaal 227 m<sup>2</sup>.

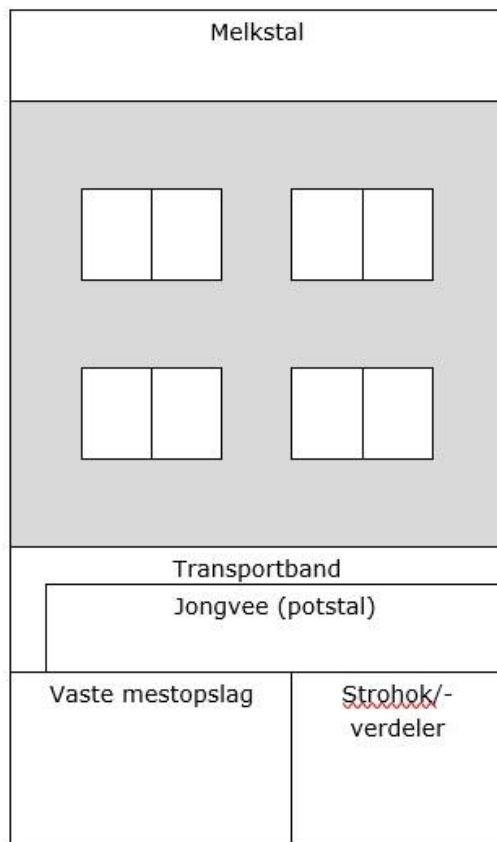
De mestopslag werd onderverdeeld in een grid van 12 blokken van ongeveer 20 m<sup>2</sup> (Figuur 15), waarbij gepoogd werd in alle blokken waar mest lag te meten. Soms was het nodig om de mest enigszins te egaliseren om de box luchtdicht te kunnen plaatsen. Een transportband voert de mest aan en stort deze af in blok 1 (zie Figuur 15), waarna deze met een voorlader verder gestapeld wordt beginnend in blok 4. Gaandeweg vult zich zo de gehele opslag, waarbij in laatstgenoemd blok de oudste mest ligt. Voor het uittredende mestvocht bevindt zich in blok 11 (ingang) een afvoer richting de urinekelder.

|              |    |              |    |
|--------------|----|--------------|----|
| 1<br>Afstort | 2  | 3            | 4  |
| 5            | 6  | 7            | 8  |
| 9            | 10 | 11<br>Ingang | 12 |



**Figuur 15** (links) Schematische weergave van de opslag voor vaste mest met grid voor metingen. (Rechts) Foto van de opslag met afstort/mestband.

Daarnaast werd in de melkveestal ook gemeten. Hiertoe werden zo mogelijk aan de kop, halverwege en eind van de stal gepaarde metingen gedaan waarbij de box over een dicht gedeelte of een urinegat geplaatst werd.<sup>16</sup> Op deze wijze wordt inzicht gekregen waar methaan ontstaat cq. vrijkomt. Het aantal metingen was hierbij afhankelijk van de tijd resterend na het bemeten van de vaste mestopslag. Dit aantal varieerde daardoor van twee bij een volle vaste mestopslag, tot twaalf wanneer deze vrijwel leeg was. Elke boxmeting duurde ca. 20 minuten.



**Figuur 16** Schematische weergave van het Kwatrijn. Grijs: mestbesmeurd oppervlak.

<sup>16</sup> In principe wordt de statische box-meetmethode niet op open ruimtes (d.w.z. de urinegaten) toegepast. Hier is dit wel gedaan bij gebrek aan een betere methode om een indruk te kunnen krijgen van de mogelijke methaanemissie uit de urinekelder.

Er werden gedurende een jaar éénmaal per 2 maanden metingen uitgevoerd. De eerste meetdag was op 25-11-2020 en de laatste op 22-09-2021.

Data werd geanalyseerd met de bij de FTIR-monitor horende applicatie Calcmet (versie 12.202). In de software worden zo nodig compensaties uitgevoerd voor andere componenten dan de te analyseren gassen. Naast water (standaard) werd in de analyse gecompenseerd voor de belangrijkste niet-methaan vluchtige organische stoffen (propaan-1-ol, ethylacetaat, isopropanol, acetaldehyde en n-propylacetaat), ethanol en vluchtige vetzuren (azijnzuur en boterzuur). Het resultaat daarvan is een outputfile met de concentraties per tijdvak van 20 seconden. Begin en eind van een meting werden uit de aantekeningen gedurende meetdagen gehaald, en geverifieerd door de data te plotten. Daarmee was ook een visuele inspectie van de data mogelijk, bijvoorbeeld of er reden is te veronderstellen dat de box niet goed geplaatst was en er daardoor mogelijk uitwisseling met de omgevingslucht was.

Om de emissies te berekenen werd de formule uit paragraaf 2.3 toegepast, met dien verstande dat inhoud van de box 4,98 m<sup>3</sup> bedroeg en bemeten oppervlak 5,5 m<sup>2</sup> groot was.

Naast de 'online' metingen werden van de uitgaande lucht van de statische box verzamelmonsters genomen ter verificatie. Dit betrof zogenaamde broeikasgasvaten, en natchemische impingers voor ammoniak (Mosquera et al., 2019). Na monsternamen werden deze in het lab respectievelijk met gaschromatografie geanalyseerd op methaan, lachgas en koolstofdioxide dan wel een fotometrische bepaling van ammoniak uitgevoerd.

### 5.3.2 AMP & BMP bepalingen

Op de eerste meetdag werden monsters genomen van de dunne fractie en de vaste mest voor het bepalen van het methaanproductiepotentieel (BMP) en de daadwerkelijke (actuele) methaanproductie (AMP). De analyses werden door LeAF uitgevoerd. In dit rapport nemen we de beschrijving van de methode en de resultaten zoals aangeleverd door LeAF (Schuman et al., 2021) bijna letterlijk over, tekstuele aanpassingen en beschouwingen zijn toegevoegd voor de leesbaarheid en de duiding van de resultaten.

AMP en BMP bepalingen zijn uitgevoerd volgens het protocol dat binnen het EU-project M4Models is ontwikkeld. De mestmonsters waren:

- Dunne fractie
- Vaste mest

De monsters zijn gebruikt zoals aangeleverd na monsternamen. Gedurende de tijd tussen aanlevering en het inzetten van de test is het materiaal voor de BMP-bepaling opgeslagen bij 4 °C, en voor de AMP-bepaling bij een incubatietemperatuur van 15,5 °C gelijk aan de condities tijdens monsternamen. Er is een karakterisering van het materiaal uitgevoerd op basis van de volgende parameters: droge stof- en organische stofgehalte, pH en vluchtige vetzuren. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 17.

**Tabel 17** Resultaten van de karakterisering van de monsters aangeleverd op 25-11-2020.

|                      |          | Dunne fractie | Vaste mest |
|----------------------|----------|---------------|------------|
| pH                   | -        | 8,1           | 7,6        |
| Droge stof (DS)      | g/kg     | 116           | 153        |
| Organische stof (OS) | g/kg     | 73,2          | 113        |
| % OS van DS          | -        | 63            | 74         |
| Vluchtige vetzuren   | mg CZV/l | 2.779 ± 6     | 3.660 ± 19 |
| Acetaat              | mg/l     | 2.024 ± 57    | 2.596 ± 14 |
| Propionaat           | mg/l     | 237 ± 34      | 362 ± 1    |
| Butyraat             | mg/l     | 79 ± 9        | 111 ± 3    |
| Valeraat             | mg/l     | 58 ± 7        | 69 ± 1     |

### Anaerobe afbreekbaarheidstest

De testen voor de bepaling van het biogaspotentieel zijn uitgevoerd in 1-literflessen met een totaal vloeistofvolume van 200 ml. Het monster 'dunne mestfractie' is zoals gebruikelijk in duplo ingezet.

De 'vaste mest' was erg heterogeen en is daarom voor de zekerheid in triplo ingezet. Als entmateriaal is digestaat van rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) Ede gebruikt. Een controle test met alleen entmateriaal is uitgevoerd om te kunnen corrigeren voor endogene biogasproductie uit het entmateriaal. Aan alle flessen zijn macronutriënten, sporenelementen en een fosfaatbuffer (pH 7) toegevoegd. De testen zijn uitgevoerd bij 35 °C onder continue menging op een schudbak (100 rpm). Voor aanvang van de testen is de gasfase van alle flessen vervangen door stikstofgas. Gedurende de test werd de gasproductie regelmatig gevolgd met behulp van een drukmeetsysteem. Aan het eind van de test is de biogassamenstelling geanalyseerd. De testperiode was 41 dagen.

### AMP

De AMP-bepaling is uitgevoerd volgens het protocol dat binnen het EU-project M4Models is ontwikkeld. Met de ongezeefde monsters is de methaanproductie gemeten, zowel na 1 dag (test uitgevoerd in 6-voud), als na 7 dagen (test uitgevoerd in 3-voud). De incubatietemperatuur was 15,5 °C.

### Analyses

*pH:* de pH is gemeten met een dagelijks gekalibreerde pH-elektrode.

*Vluchtige vetzuren:* het gehalte aan vluchtige vetzuren van de opgeloste fractie werd gaschromatografisch bepaald. De voorbereiding van de monsters bestond uit verdunnen van het substraat, tien minuten centrifugeren bij 10.000 rpm, en verdunning van het supernatant met 3% mierenzuur. Deze analyse betreft vluchtige vetzuren met een ketenlengte van 2 t/m 5 koolstofatomen (azijnzuur, propionzuur, boterzuur en valeriaanzuur). De detectielimiet was voor elk vetzuur 20 mg/l.

*Gasproductie en -samenstelling:* het volume geproduceerd biogas werd bepaald met behulp van een drukmeetsysteem. De gehalten methaan en koolstofdioxide in het biogas werden gaschromatografisch bepaald.

*Droge en organische stofgehalte:* het gehalte droge stof en organische stof werd bepaald volgens de standaardmethode, met droging van de monsters bij 105 °C en verassing bij 550 °C.

## 5.4 Resultaten

### 5.4.1 AMP

In Tabel 18 staan de gemiddelde waarden voor de methaanproductiesnelheid weergegeven, en de methaangehaltes in de testbuizen aan het eind van de test. In de 24-uurstest met de dunne fractie zijn twee afwijkende methaangehaltes gemeten. Deze zijn weggelaten in de berekening van het gemiddelde, omdat het waarschijnlijk lag aan de bemonstering van het gas. In de testen met de vaste mestfractie is ook een variatie waargenomen in het methaangehalte na 24 uur. De gasbemonstering en -verdunning zijn daarna verbeterd voor toekomstige methaananalyses voor AMP-bepalingen. Het methaangehalte van de testbuizen op dag 7 is in duplo gemeten, en deze laten consistente resultaten zien.

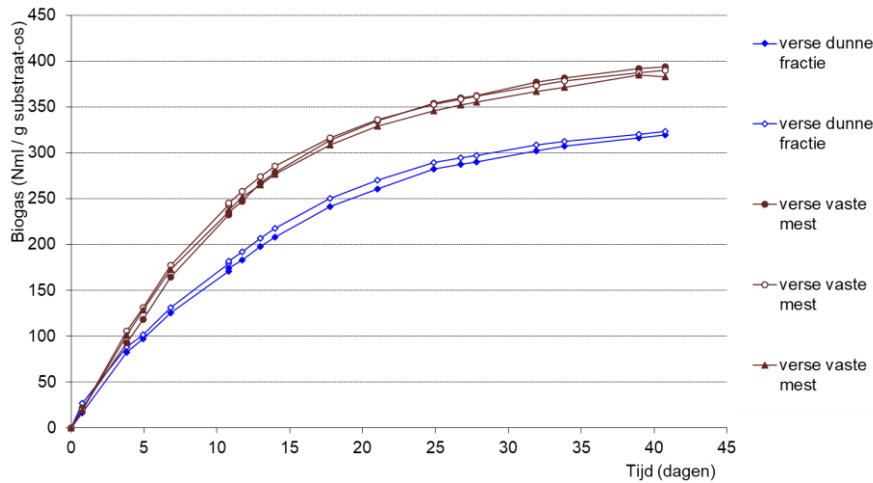
**Tabel 18** Samenvatting van de AMP-testresultaten.

| Monster       | testperiode |      | CH <sub>4</sub> productiesnelheid (g CH <sub>4</sub> /kg OS-monster/d) |       | Gassamenstelling aan het eind van de test (ppm CH <sub>4</sub> in buis) |       |
|---------------|-------------|------|--|-------|---|-------|
|               | uur         | dag  | gem.   | stdev | gem.  | stdev |
| Dunne fractie | 22          | 0,90 | 0,13 (n=4)   | 0,01  | 1.424   | 115   |
| Dunne fractie | 171         | 7,10 | 0,14 (n=3)   | 0,02  | 11.959  | 2.366 |
| Vaste fractie | 21          | 0,86 | 0,02 (n=6)   | 0,02  | 474   | 353   |
| Vaste fractie | 170         | 7,06 | 0,14 (n=3)   | 0,03  | 18.061  | 987   |

### 5.4.2 BMP

In onderstaande figuur wordt het verloop van de biogasproductie uit de monsters weergegeven in Nml biogas per g substraat-OS. In Tabel 19 staan daarnaast ook de gemiddelde waarden voor de

biogasproductie weergegeven in m<sup>3</sup> per ton substraat, en het methaangehalte van het biogas. Alle getallen zijn gecorrigeerd voor de gasproductie uit de blanco/controle met alleen entmateriaal.



**Figuur 17** Biogasproductie in Nm<sup>3</sup> biogas/g substraat-OS.

**Tabel 19** Samenvatting BMP testresultaten.

| Monster       | Biogasproductie                     |                                  | CH <sub>4</sub> gehalte in het biogas (%) |
|---------------|-------------------------------------|----------------------------------|---|
|               | (Nm <sup>3</sup> /ton substraat-OS) | (Nm <sup>3</sup> /ton substraat) |   |
| Dunne fractie | 322 ± 2                             | 23,5 ± 0,1                       | 56  |
| Vaste mest    | 390 ± 5                             | 44,2 ± 0,3                       | 54  |

Deze testen zijn uitgevoerd bij 35 °C onder standaard (ideale) laboratoriumcondities met een niet-geadapteerd inoculum. De verkregen resultaten geven dan ook het maximale biogaspotentieel onder deze standaardcondities. Afhankelijk van de toegepaste procescondities kan de biogasopbrengst in de praktijk zowel hoger als lager uitvallen.

Volgens deze analyses zou geconcludeerd kunnen worden dat de potentie om methaan te emitteren van vaste mest groter is dan die uit de dunne fractie (zie Figuur 17). Echter de AMP-analyse liet zien dat de dunne fractie ook verantwoordelijk is voor methaanemissie.

#### 5.4.3 Broeikasgas en ammoniakemissiemetingen

Omdat de vaste mest in leeftijd varieert afhankelijk van de plek in de vaste mestopslag, is het niet zinvol een gemiddelde emissie te presenteren. In plaats daarvan zijn de metingen schematisch weergegeven voor de verschillende meetdagen (Tabel 20). Hierbij is de schematische weergave van Figuur 16 gereproduceerd en dus waar de emissiemetingen plaatsvonden. Met een kleurschaal is aangegeven waar en wanneer zich de hoogste emissies voordoen. Wanneer meerdere resultaten beschikbaar zijn, zoals bij de stalvloer is de mediaan weergegeven.

**Tabel 20** Resultaten emissiemetingen (in mg/m<sup>2</sup>/u) met de statische boxmethode, waarbij per gas met een kleurschaal van rood naar groen is aangegeven waar en wanneer de hoogste emissies plaatsvinden. Bij metingen gemarkeerd n.d. was de emissie niet detecteerbaar, metingen met afg. zijn afgekeurd om technische redenen. Ten aanzien van de mestopslag (per gas) worden de emissies per blok gegeven. De met blauw gekleurde blokken geven de metingen weer die plaatsvonden boven de afvoer van het mestvocht van de vaste mest naar de gierkelder.

|  |               | M1: 25-11-2020 | M2: 20-01-2021                        | M3: 24-03-2021      | M4: 19-05-2021      | M5: 28-07-2021 | M6: 22-09-2021 |
|--|---------------|----------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------|----------------|
| CH <sub>4</sub><br>mg/m <sup>2</sup> /u  | dichte vloer  | 9,89           | n.d.                                  | 1,16                | n.d.                | 2,91           | 0,76           |
|  | vloer met gat | 687            | 16,6                                  | -                   | 154                 | 163            | 213            |
|  | mestopslag    | 592 n.d. n.d.  | n.d. n.d.                             | 20,7 2,80 98,8 7,78 | afg. 8,23 0,35 afg. | 49,1 117       | 175 192 afg.   |
|  |               | n.d. 398       | n.d. 43,9 125 n.d.<br>13,1 2,23 n.d.  | n.d. 11,3           | afg. 60,3 afg. afg. | afg. 304       | 374 1054       |
| NH <sub>3</sub><br>mg/m <sup>2</sup> /u  | dichte vloer  | 28,0           | 57,3                                  | 58,4                | n.d.                | 3,32           | n.d.           |
|  | vloer met gat | 16,3           | 25,3                                  | -                   | n.d.                | 7,78           | 1,03           |
|  | mestopslag    | n.d. 0,84 n.d. | 3,16 1,57                             | 1,10 2,93 0,83 0,21 | 0,00 n.d. 0,29 n.d. | 6,21 n.d.      | 12,1 afg. afg. |
|  |               | 0,42 n.d.      | n.d. n.d. 3,73 n.d.<br>0,67 0,03 n.d. | 4,14 n.d.           | n.d. 0,83 0,58 0,97 | n.d. n.d.      | 0,14 n.d. n.d. |
| N <sub>2</sub> O<br>mg/m <sup>2</sup> /u | dichte vloer  | n.d.           | n.d.                                  | 0,02                | n.d.                | 0,04           | 0,05           |
|  | vloer met gat | 20,8           | 0,50                                  | -                   | 4,59                | 3,68           | 4,58           |
|  | mestopslag    | 0,13 n.d. n.d. | 0,04 0,11                             | 0,06 n.d. n.d. n.d. | 0,07 n.d. n.d. n.d. | n.d. 0,10      | 0,18 1,25 2,19 |
|  |               | n.d. 5,13      | 0,06 n.d. 0,34 n.d.<br>0,00 0,04 n.d. | 0,04 0,07           | n.d. n.d. 0,05      | n.d. 2,64      | 8,06 14,5      |

---

Bij een aantal metingen nam de concentratie in de Lindvall-doos in eerste instantie sterk toe om vervolgens weer te dalen. Hierdoor zijn een aantal metingen afgekeurd, maar dit effect is niet goed te verklaren. Daarnaast zijn metingen boven de vloer met een urinegat en zeker de afvoer van het mestvocht naar de gierkelder mogelijk niet representatief. Zeker bij de laatste vindt hier een emissie van een groter oppervlak plaats.

Desalniettemin zijn emissies in de zomer hoger dan in de winter, en lijkt NH<sub>3</sub> met name op de stalvloer gevormd te worden en CH<sub>4</sub> in verse (of natte) plekken op de mesthoop. In de kelders vindt echter ook emissie van CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O plaats.

Vergelijking van de resultaten tussen monitor en referentiemethode (hier niet gepresenteerd) laat zien dat de FTIR de concentraties CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O mogelijk overschat. Bij NH<sub>3</sub> komen de metingen gemiddeld wel overeen, maar in alle gevallen is de variatie groot. Hier dient echter te worden opgemerkt dat de metingen zich in een laag bereik bevonden (CH<sub>4</sub> < 200 ppm en NH<sub>3</sub> < 5 ppm). Ook is het aantal waarnemingen met vijf tot zes nog beperkt. Deze aspecten verdienen bij verder onderzoek nadere aandacht.

## 5.5 Discussie en reflectie

Dit type melkveebedrijf heeft perspectief vanuit verschillende invalshoeken. Denk aan dierenwelzijn, samenwerking met natuurbeschermingsorganisaties en andere maatschappelijke actoren, zorg voor de bodem en omgang met mest en dus met mineralenstromen. Bij dit specifieke bedrijf zou de scheiding van feces en urine verbeterd kunnen worden (Puente-Rodríguez et al., 2021). De 3 cm grote urine-afvoergaatjes laten niet alleen de urine door maar ook mogelijk voerresten, stukken stro en feces. Deze factoren kunnen de lachgas- en methaanemissies verklaren die in de lucht uit de kelder met de dunne fractie via de gaten in de stalvloer zijn waargenomen. Ook zijn deze twee emissies relatief hoog op het afvoergat voor mestvocht vanuit de vaste mestopslag naar de gierkelder. Daarom zou het verstandig zijn om aandacht te besteden aan de afvoergaten van dunne fractie naar de kelder (op de looppaden en bij de vaste mest opslagruimte) en deze kelder beter gasdicht maken + maatregelen bedenken om deze emissies te neutraliseren (licht aanzuren<sup>17</sup>, oxideren, etc.).

Ten aanzien van de ammoniakemissie zijn de relatief lage waargenomen emissiewaardes niet direct opmerkelijk. Dit is een snel verlopend proces en de metingen vonden doorgaans pas geruime tijd (uren) na excretie plaats als bij de afstort of in de stal gemeten werd. Verder is dit bedrijf zoals eerder gezegd bijzonder in veel opzichten (type koeien, mest management etc.). Ook met een ander staltype zou dit bedrijf qua intensiteit en daarmee emissies naar verwachting laag scoren. Dit maakt het dan ook moeilijk om dit bedrijf met de gangbare bedrijven te vergelijken. Ook hebben we bijvoorbeeld een onderdeel van de stal, de potstal, die voor jongvee wordt gebruikt uit dit onderzoek gelaten. Zo'n potstal zou niet snel worden geïmplementeerd bij andere melkveebedrijven.

Eerdere door het Louis Bolk Instituut (LBI) uitgevoerde verkennende emissiemetingen lieten een ammoniakemissiereductie van rond 50% zien t.o.v. een melkveebedrijf met een traditionele roostervloer (Deru et al., 2018). Er zijn wel een aantal beperkingen van het onderzoek van het LBI die benoemd moeten worden. Een aantal hiervan zijn uiteraard ook van toepassing voor dit rapport. Bijvoorbeeld zijn in de Kwatrijn stal Jersey koeien terwijl in de referentiestal HF-koeien waren, of de biologische/gangbare bedrijfsvoering. Daarbij heeft LBI ook maar gedurende een dag met de statische box gemeten. In dit onderzoek werd weliswaar gedurende zes meetdagen verspreid over het jaar gemeten, maar het blijft moeilijk om conclusies te trekken. Zo is dit een extensief bedrijf waarbij weidegang belangrijk is en dus zijn de koeien vaak niet in de stal aanwezig, ook tijdens de meetdagen<sup>18</sup>. Daarbij begonnen de metingen altijd bij de vaste mestopslag, en pas in de middag werden er emissiemetingen op de loopvloeren uitgevoerd.

---

<sup>17</sup> Dit is een biologisch melkveebedrijf dus wat aanzuren betreft zou het verstandiger zijn om de potentie van organische zuren te exploreren (Puente-Rodríguez et al., 2022) die, in principe, beter passen bij de filosofie van deze bedrijfsvoering.

<sup>18</sup> Weidegang in 2021: 3.912 uur verdeeld over 247 dagen (gebaseerd op inschattingen van de melkveehouder). Hierdoor wordt ook een kleiner deel van de mest in de stal opgeslagen dan gebruikelijk (ter vergelijking: realisatie ligt doorgaans rond de 2.000 uur/jaar, zie bijvoorbeeld <https://www.cono.nl/duurzaamheid/weidegang/>).



Dan waren de koeien al lang vertrokken en de vloeren droog. Omdat dit onderzoek zich richt op de emissies uit opgeslagen mest, was dat ook juist de bedoeling. Daarom en hoewel, in principe, dit systeem perspectief biedt dienen protocollaire metingen inzicht te geven in de werkelijke (totale) emissies van het systeem. Gezien het zeer open karakter van de stal zal ook dat echter niet eenvoudig zijn. Ten aanzien van in de buitenlucht opgeslagen vaste mest is wel bekend dat stikstofverliezen en methaanemissie klein zijn ten opzichte van vaste mest die binnen in potstallen wordt opgeslagen, of drijfmest (CDM, 2017; Mosquera et al., 2005). In Tabel 21 worden de omgerekende indicatieve resultaten weergegeven.

**Tabel 21** Indicatieve omrekening van waargenomen methaanemissies (kg CH<sub>4</sub>/melkkoe/jaar) uit mest de door de Emissieregistratie<sup>19</sup> gehanteerde waarde. Voor ammoniak in de Rav geen waarde voor vaste mest beschikbaar, deze is op basis van de TAN-verhouding<sup>20</sup> geschat waarbij is 25 – 40 % (Van Dooren et al., 2019) aangenomen als bijdrage van de kelderemissie aan de totale emissie.

| Emissie                  | Het Kwatrijn                   | Emissieregistratie                                      |
|--------------------------|--------------------------------|---|
| CH <sub>4</sub> uit mest | 11,3 kg CH <sub>4</sub> /mk/jr | 11,1 kg CH <sub>4</sub> /mk/jr                          |
| NH <sub>3</sub> uit mest | 0,4 kg NH <sub>3</sub> /mk/jr  | 2,3 (25%) – 3,6 (40% van 9,0) kg NH <sub>3</sub> /mk/jr |

<sup>19</sup> Er gelden aparte factoren voor drijfmest (37,5 kg CH<sub>4</sub>/dier) en vaste mest (4,5 kg CH<sub>4</sub>/dier) in rapportagejaar 2020 (Van Bruggen et al., 2022). Uitgaande van 20% dunne fractie en 80% vaste mest wordt verwachte emissie dan 11,1 kg CH<sub>4</sub>/dier/jaar.

<sup>20</sup> In 2020 was de excretie in de stal 130,5 kg/dier, waarvan 56% als TAN. In dunne mest vindt 10% mineralisatie van organische N plaats, bij vaste mest wordt 25% van de TAN geïmmobiliseerd (Van Bruggen et al., 2022). Daarmee komt de TAN-excretie bij drijfmest op 79 kg uit en bij vaste mest op 55 kg. Bij deze verhouding zou de emissie op 0,7 x 13 = 9 kg NH<sub>3</sub>/dierplaats/jaar liggen. Gegeven de beweidingssituatie en het extensieve karakter, zal werkelijke emissie bij het Kwatrijn naar verwachting echter lager zijn.

---

## 6 Inzichten rondom dierenwelzijn bij 'dichte' loopvloeren in melkveestallen

Wijbrand Ouweltjes, Hans Hopster & Daniel Puente-Rodríguez

Door middel van een deskstudie is onderzocht in hoeverre op grond van bestaande kennis en ervaringen, inschattingen kunnen worden gemaakt van effecten van potentiële emissiebeperkende vloermaatregelen voor welzijn. Dit hoofdstuk is een samenvatting van een paper waarin de belangrijkste inzichten van deze studie worden gepresenteerd (Ouweltjes et al., in voorbereiding).

De meeste methaanemissie reducerende maatregelen die in dit rapport worden besproken zijn echter nog in ontwikkeling. Voor de nog nauwelijks geïmplementeerde maatregelen zijn tijdens de deskstudie geen ervaringen of literatuur gevonden over hun mogelijke impact op dierenwelzijn. Als maatregelen zoals het koelen of beluchten van mest terrein winnen in de melkveehouderij zullen, onder andere, de volgende vragen relevant worden: wat is het effect van mest koelen op het binnenklimaat in melkveestallen en wat voor impact heeft dit op dierenwelzijn? En van mest beluchten? In de afgelopen tien jaar is er wel meer inzicht ontstaan in de rol van vloeren in het ontstaan en voorkomen van emissies. Loopvloeren zijn in het algemeen de meest met mest besmeurde oppervlaktes in melkveestallen, en zijn samen met mestopslagen belangrijke schakels bij het ontstaan van gasvormige emissies in de melkveehouderij. Een aantal technieken is gericht op het scheiden (en gescheiden houden) van urine (dunne fractie) en feces (dikke fractie) na excretie en beide fracties snel uit de leefruimte van de dieren af te voeren en gescheiden op te slaan. Hierin spelen vloeren een belangrijke rol, waarbij voorkomen moet worden dat bij het afvoeren van mest een dunne laag versmeerde mest achterblijft die alsnog voor ammoniakemissie zorgt. Omdat het merendeel van de Nederlandse melkveestallen is voorzien van roostervloeren met mestkelders voor mestopslag eronder vergt emissiereductie via dit spoor echter maatregelen in de leefomgeving van melkkoeien zoals aanpassing van loopvloeren (gescheiden opvang van mest en urine is met traditionele roostervloeren niet goed mogelijk) die ook het welzijn van de koeien kunnen beïnvloeden. Daarom is de deskstudie beperkt tot effecten van vloermaatregelen om emissies te beperken.

In de praktijk blijkt dat emissiearme loopvloeren koeien vaak weinig grip bieden, waardoor slip- en valpartijen voorkomen met alle mogelijke gevolgen van dien. Bovendien passen koeien hun locomotie op gladde vloeren op onnatuurlijke wijze aan en worden ranglage dieren beperkt in hun mogelijkheden om confrontaties met ranghogere dieren te vermijden. Voldoende grip op loopvloeren is daarom een voorwaarde voor goed dierenwelzijn. Dit kan bereikt worden door een ruw oppervlak, door profilering of door indrukbaarheid van de toplaag. Met name een ruw oppervlak en in mindere mate profilering dragen echter niet zonder meer bij aan vermindering van emissies. Een potentieel nadeel van ruwe vloeroppervlakken is dat deze minder gemakkelijk schoon zijn te houden en er bij gebruik van een mestschuif meer mest zal achterblijven. Dit geldt waarschijnlijk ook voor vloeren met profilering. In de praktijk worden betonnen loopvloeren bijvoorbeeld door de werking van een mestschuif na verloop van tijd vaak glad ondanks dat ze bij ingebruikname voldoende grip boden. Vloeren die voldoende grip bieden door indrukbaarheid hebben deze nadelen niet. Bij toenemende ruwheid neemt niet alleen de grip maar ook de slijtage van het klauwhoorn toe. Als dit niet door snellere aangroei kan worden gecompenseerd kunnen dunne en kwetsbare zolen ontstaan. Indien de vorm van de hoornschoen door geringe slijtage gaat afwijken (over het algemeen past de aangroei zich echter aan de slijtage aan) dan kan dit door bekappen worden gecorrigeerd, maar als dit niet tijdig gebeurt kan het de locomotie en daarmee ook het welzijn negatief beïnvloeden.

Een volgende eigenschap van vloeren, die ook gerelateerd is aan beloopbaarheid, is drukverdeling via de zool over het levende weefsel in de klauwen. Hierbij is ook de vorm en vervormbaarheid van de zool van belang, hetgeen hierboven al is aangestipt. Betonvloeren zijn niet vervormbaar en kunnen als ze zijn voorzien van uitsparingen zoals roosterspleten niet altijd volledige ondersteuning van de klauwen bieden.

---

Vloeren met oneffen oppervlakken, maar ook bijvoorbeeld steentjes op de vloer of kabels en katrollen van een mestschuif, zorgen voor verhoogde puntbelasting van de klauwen wat kan leiden tot directe mechanische beschadiging maar ook tot verslechterde doorbloeding. Dat laatste veroorzaakt in de eerste plaats irritatie ("discomfort"), maar kan ook leiden tot verminderde kwaliteit van het hoorn en zoolbloedingen. Ook met het oog op drukverdeling zijn vloeren met een zacht loopoppervlak te prefereren boven harde niet vervormbare vloeren.

Hygiëne is een derde eigenschap van vloeren die van belang is voor welzijn. Koeien zijn anders dan bijvoorbeeld varkens van nature geen zindelijke dieren. Zij lozen hun mest en urine op de plek waar ze zich bevinden op het moment dat ze aandrang krijgen. Ze zijn niet geneigd om hun leefomgeving schoon te houden. Maar in de beperkte leefruimte die ze hebben in stallen is de impact daarvan wezenlijk anders dan wanneer ze zich buiten in de weide bevinden. Hoewel de directe impact van met mest bevulde vloeren niet heel duidelijk is (er zijn wel wat aanwijzingen dat runderen direct contact met hun mest vermijden als ze daarvoor de ruimte hebben) heeft het in ieder geval indirect nadelige gevolgen. Een met mest bevulde vloer is een omgeving waar ziektekiemen goed kunnen gedijen, wat nadelig is voor met name klauwgezondheid en uiergezondheid. Verder kan vooral door een dunne laag mest die na schuiven van de vloer achterblijft een vloer glad en slecht begaanbaar worden. In vergelijking met grip en drukverdeling is hygiëne een eigenschap die in veel sterkere mate wordt bepaald door de mate waarin en de wijze waarop de vloer wordt schoongehouden (managementmaatregelen) dan door eigenschappen van de vloer op zich. Bij roostervloeren zal een deel van de mest ook zonder schuiven in de mestkelder terecht komen terwijl de mestafvoer bij dichte vloeren volledig door het schuiven wordt bepaald. In de praktijk wordt tegenwoordig ook bij roostervloeren vaak een mestschuif of een mestrobot toegepast. De uitvoering en gebruik van de schuif hebben ook direct invloed op het welzijn, zo kunnen schuiven leiden tot klauw- en pootbeschadigingen en onrust aan het voerhek.

In hoeverre kan er nu op grond van bovenstaande overwegingen iets worden gezegd over de impact van emissiebeperkende maatregelen in bestaande melkveestallen, met name de vervanging van roostervloeren door dichte vloeren, voor dierenwelzijn? Het blijkt dat er inmiddels een heel scala aan ammoniakemissiebeperkende vloersystemen is ontwikkeld, en dat zowel "dichte vloeren" als "roostervloeren" categorieën zijn die elk een grote variatie aan uitvoeringstypen kennen. Daarbij komt dat ook factoren als voeding, genetische aanleg, omgang met de dieren en m<sup>2</sup>/koe invloed kunnen hebben op het ontstaan van klauwaandoeningen. Ook kan de beloopbaarheid van een vloer in de loop van de tijd gaan veranderen door slijtage. Er blijkt dan ook geen principieel onderscheid te zijn tussen emissiearme dichte vloeren en roostervloeren wat betreft de impact op welzijn.

In het algemeen kan wel gesteld worden dat vloeren met een zacht loopoppervlak met het oog op welzijn zijn te prefereren boven vloeren met een hard loopoppervlak zoals betonnen vloeren. De wijze waarop en de frequentie waarmee mest van het vloeroppervlak wordt verwijderd is voor de meeste vloeren van grote invloed op de mate waarin emissies beperkt kunnen worden. Voor verwijdering van mest zijn tegenwoordig meerdere opties beschikbaar (mestschuif, robot die schuift of opneemt) met waarschijnlijk ieder hun eigen effecten op welzijn. Deze effecten zijn echter nog niet goed gekwantificeerd. Schoonhouden van de vloeren zal, mits de dieren geen beschadigingen oplopen door de gebruikte apparatuur, er geen stress wordt ervaren en de vloeren hierdoor niet glad worden, positief zijn voor het welzijn.

---

# 7 Kansen en belemmeringen voor adoptie

Nico Bondt, Daniel Puente-Rodríguez, Alfons Beldman & Bram Bos

De melkveehouderij staat voor de uitdaging om bij te dragen aan het oplossen van het klimaatprobleem en emissies van broeikasgassen te verlagen. Hiertoe wordt gezocht naar stal- en mestmaatregelen die in de praktijk haalbaar zijn en indien mogelijk ook het rendement verbeteren. De verschillende kansen en belemmeringen voor de adoptie van een aantal van deze maatregelen worden in dit hoofdstuk besproken.

Dit hoofdstuk bespreekt eerst de methodologische aanpak van deze studie. Daarna komen de belangrijkste adoptiefactoren aan de orde. Het hoofdstuk wordt afgesloten met visies vanuit de praktijk en enkele voorzichtige conclusies.

## 7.1 Aanpak

Om inzicht te krijgen in de meest bepalende factoren voor de adoptie van stal- en mestmaatregelen voor emissiereductie, is de volgende werkwijze gebruikt.

Onderzoekers van Wageningen University & Research hebben samen met experts van LTO Projecten de belangrijkste aspecten geïdentificeerd, die een rol spelen bij de adoptie van technische maatregelen in de melkveehouderij. Een groslijst met maatregelen is in een Excelbestand gezet en in een workshop geëvalueerd. Daarin werden de maatregelen beschreven en experts hebben vragen beantwoord of scores gegeven voor bepaalde adoptiefactoren (bijv. score 1 tot 5 of n.v.t. waarbij 1 betekende 'gunstig', 'past goed in bestaande stallen' etc. en 5 'ongunstig', 'moeilijk inpasbaar in bestaande stallen', etc.).

Vervolgens hebben ze samen met een aantal experts, veehouders en adviseurs, in enkele workshops de stimulerende en remmende factoren voor adoptie voor een aantal praktijkrijpe combinaties van maatregelen geïnventariseerd en de mogelijkheden verkend. De resultaten van deze workshops zijn al eerder gepubliceerd, zie: [Resultaten workshops: kansen en belemmeringen voor adoptie van technieken voor verlaging methaanemissie uit mest in melkveestallen - Integraal aanpakken](#) (geraadpleegd maart 2022). In dit hoofdstuk is een korte samenvatting van deze resultaten verwerkt.

In aanvulling op de expertconsultaties is onderzocht voor welke aantallen bedrijven de meest kansrijke combinaties van maatregelen geschikt zouden kunnen zijn. Hiervoor is een gecombineerde dataset gebruikt met gegevens uit de Landbouwtelling (Opgave Huisvesting) en het Bedrijven-Informatienet. Deze gecombineerde dataset bevat gegevens over de opzet van het bedrijf (aantallen dieren, hectares e.d.) en over de stallen op deze bedrijven (inclusief vloertypen).

## 7.2 Belangrijkste adoptiefactoren

Verschuillende aspecten zijn bepalend voor de kansen voor adoptie van nieuwe technieken en maatregelen in bestaande melkveebedrijven (zie Bijlage 2):

- 
1. Technische toepasbaarheid in bestaande stallen: is de techniek toepasbaar in een bestaande stal (of in de bestaande situatie op het erf)?
  2. Bedrijfsopzet:
    - 2.1. Leeftijd stal
    - 2.2. Intensiteit/mestafvoer in de uitgangssituatie. Als er in de uitgangssituatie al sprake is van mestafvoer, dan komen mestbewerkingstechnieken eerder in aanmerking. Score op basis van bedrijf met mestafvoer.
  3. Ondernemers:
    - 3.1. Stoppers: Ondernemers ouder dan 55 jaar en zonder opvolger zullen niet snel meer investeren in kostbare nieuwe technieken.
    - 3.2. Bedrijfsstijl: Sommige technieken vragen specifieke interesse en vaardigheden en zijn daardoor niet voor elk type ondernemer geschikt.
  4. Risico's: ontploffingsgevaar, brandgevaar, werken met zuur, ongedierte.
  5. Inpasbaarheid:
    1. Effect op ammoniakemissie
    2. Past maatregel binnen bestaande vergunning?
    3. Effect op (extra) mestopslag en handling van mest
    4. Effect op de koe en diermanagement. Bijvoorbeeld ten aanzien van dierenwelzijn (gladde vloer), klimaat in de stal
    5. Effect op arbeid/management. Vraagt het extra werk, voegt het complexiteit toe?
    6. Zijn er effecten te verwachten op weidegang?
  6. Economie
    1. Benodigde investering
    2. Operationele kosten en baten (kosten minus baten, dus netto kosten)
    3. Effecten op mestafzet
    4. Waardevermindering van eerder gedane investeringen (bijvoorbeeld in mestopslag)
    5. Ontwikkelruimte, vooral in relatie tot ammoniakemissie
    6. Is verwaarding mogelijk? (Maakt de technologie andere verwaarding of nieuwe producten mogelijk?)
    7. Andere baten/kosten? (Bijv. immaterieel)
  7. Maatschappelijke acceptatie
    1. Beeld impact op dierenwelzijn
    2. Beeld natuurlijkheid van de productie
    3. Inpasbaarheid en impact op landschap
    4. Overige maatschappelijke aspecten?

De adoptie van bepaalde emissiebeperkende systemen kan worden versterkt door de kansen te vergroten en/of belemmeringen weg te nemen. Daarom is op basis van expertconsultatie per techniek in beeld gebracht wat de meest remmende en meest stimulerende factoren voor adopties zijn.

Bij de nadere analyse, op basis van cijfers uit de Landbouwtelling en het Bedrijveninformatienet, is gekeken naar de volgende factoren: a) bedrijfsgrootte, b) grondgebondenheid (koeien per hectare), c) ruimte op het bouwblok, d) mestopslagcapaciteit buiten de stal, e) aandeel stoppers (oudere ondernemers > 55 jaar, zonder opvolger) en f) leeftijd van de stallen. Deze bevindingen zijn gebruikt voor een verdere duiding van de hierna beschreven resultaten uit de expertconsultatie. Het gebruikte cijfermateriaal is opgenomen in lichtgrijze kaders.

Tabel 22 geeft een overzicht van de maatregelen en hun nummering.

**Tabel 22** Overzicht van maatregelen.

| Nr. | Maatregel   | Omschrijving maatregel  |
|-----|---|---|
| 1   | Gasdichte mest-opslag                                       | Mestkelders gasdicht afsluiten en drijfmest daarin opslaan. Bijvoorbeeld door gangbare roostervloeren af te dichten met een rubbermat, of te vervangen door dichte vloeren. Gassen afzuigen en oxideren.  |
| 2   | Mest frequent uit kelder verwijderen                        | Drijfmest frequent uit de mestkelder verwijderen (bv. d.m.v. van een pomp), en drijfmest vervolgens in een gasdichte opslag houden (Let wel: aanvullende techniek nodig om gasvorming tegen te gaan, te oxideren of te benutten).   |
| 3   | Dagontmesting vanaf dichte vloer                            | Dagontmesting van drijfmest vanaf dichte vloeren, en drijfmest vervolgens in een gasdichte opslag houden (Let wel: aanvullende techniek nodig om gasvorming tegen te gaan, te oxideren of te benutten).   |
| 4   | Dagontmesting en mestscheiden                               | Dagontmesting van primair gescheiden feces en urine vanaf dichte vloeren, en feces in gasdichte opslag houden. Urine apart afgesloten opslaan (Let wel: aanvullende techniek nodig om gasvorming tegen te gaan, te oxideren of te benutten).  |
| 5   | Dagontmesting en mestscheiden (zonder gasdichte mestopslag) | Dagontmesting van primair gescheiden feces en urine vanaf dichte vloeren, en feces overdekt (maar niet gasdicht) opslaan (voorbeeld: Het Kwatrijn). Urine apart afgesloten opslaan. Eventuele aanvullende technieken om gasvormige emissies uit feces te beperken nader te bepalen.   |
| 6   | Composteren (secundaire mestscheiding)                      | Dagontmesting van drijfmest vanaf dichte vloeren, secundaire scheiding in dunne en dikke fractie, en dikke fractie gecontroleerd composteren tot > 60% DS.  |
| 7   | Composteren (primaire mestscheiding)                        | Dagontmesting van primair gescheiden feces en urine vanaf dichte vloeren, en feces gecontroleerd composteren tot > 60% DS. Urine apart afgesloten opslaan. (Nota bene: verondersteld wordt hier dat compost niet gebruikt wordt voor ligboxen, maar wordt afgezet voor bemesting en bodem-verbetering. Bij gebruik in ligboxen waarschijnlijk weer emissies).                               |
| 8   | Koelen  | Drijfmest in mestkelder koelen en regelmatig mixen t.b.v. homogene temperatuur; warmte elders benutten of desnoods warmte actief lozen.   |
| 9   | Vergisten   | Dagverse drijfmest (uit kelders of van dichte vloer) secundair scheiden en dikke fractie (mono)vergisten; biogas benutten.  |
| 10  | Aanzuren  | Drijfmest in mestkelders aanzuren met zwavelzuur via speciale mixtank buiten de stal. Buitenopslag is vereist. <sup>21</sup>  |
| 11  | Mixen of beluchten  | Drijfmest in mestkelders mixen of beluchten d.m.v. mechanisch mixsysteem of luchtmixsysteem.  |
| 12  | Methaanoxidatie   | Methaanoxidatie. Methaan afvangen d.m.v. luchtafzuiging i.c.m. methaanoxidatie d.m.v. een fakkel, een bovengronds biofilter of ondergrondse oxidatie in een veldfilter. Geen zelfstandige maatregel, maar te combineren met verschillende andere maatregelen, zoals: a) afdichten mestkelders en lucht afzuigen b) mest frequent overpompen naar externe mestopslag en daar lucht afzuigen. |

#### *Technische toepasbaarheid in bestaande stallen*

De toepasbaarheid in bestaande stallen scoort volgens de geraadpleegde experts voor de meeste technieken neutraal of net iets negatiever. De maatregelen koelen van drijfmest (8), drijfmest mixen of beluchten (11) en drijfmest frequent verwijderen uit de kelder (2) worden relatief positief beoordeeld. Methaanoxidatie (12) en dagontmesting van dichte vloeren (3, 4, 5) scoren relatief laag.

#### *Bedrijfsopzet*

De leeftijd van de stal werkt remmend bij technieken gebaseerd op dagontmesting van drijfmest vanaf dichte vloeren (6, 3, 4, 5) en bij methaanoxidatie (12). De leeftijd werkt stimulerend (past goed in bestaande stal) bij koelen van drijfmest (8), drijfmest mixen of beluchten (11) en drijfmest frequent verwijderen uit de kelder (2).

Mestafvoer in de bestaande situatie is gunstig voor maatregelen met compostering of scheiding (4, 5, 6, 7, 9).

<sup>21</sup> Puente-Rodríguez et al., 2022, zie ook <https://jhagro.com/products/jh-acidification-nh4/> (geraadpleegd juli 2021).

### *Leeftijd melkveestallen*

In 2018 waren er 15.840 bedrijven met melkvee, met in totaal 1.563.897 melkkoeien. Deze analyse heeft verder betrekking op de gespecialiseerde bedrijven. Op melkveebedrijven (14.756 bedrijven met 1.491.165 melkkoeien) worden circa 436.000 dieren (ca. 30%) gehouden in 3.983 stallen die relatief nieuw zijn, d.w.z. gebouwd in 2010 of later. De overige 70% worden gehouden in bijna 12.000 stallen die zijn gebouwd in 2009 of eerder.

Naar schatting ruim een kwart van de melkveestapel wordt gehouden in oude stallen op continuerende melkveebedrijven (dus niet de stoppers). Hierbij gaat het om meer dan 25 jaar oude stallen, gebouwd in 1994 of eerder.

### *Ondernemers*

Het merendeel van de technieken zal niet snel worden toegepast door stoppers. De enige uitzondering hierop is het continu mixen of beluchten door middel van een mechanisch systeem (11). Bedrijfsstijl (met name affiniteit met technologie) speelt vooral een rol bij technieken waar relatief complexe technologie wordt toegevoegd (scheiding, compostering: 7), in het bijzonder voor vergisting (9) en het aanzuren van mest (10). Deze technieken vragen specifieke interesse en vaardigheden en zijn daardoor niet voor iedereen geschikt.

### *Stoppers*

De opvolgingssituatie is goed in te schatten bij een leeftijdsgrens van 55 jaar. Op 8.098 van de 15.840 (2018) melkveebedrijven is het eerste bedrijfshoofd 54 jaar of jonger, en worden 858.676 melkkoeien gehouden - d.w.z. 50% van de bedrijven en 58% van alle melkkoeien op melkveebedrijven. Op 3.866 van de melkveebedrijven is het eerste bedrijfshoofd 55 jaar of ouder en is een opvolger aanwezig; op deze bedrijven worden 430.430 melkkoeien gehouden (29%). Op 2.504 melkveebedrijven is het eerste bedrijfshoofd 55 jaar of ouder en is geen opvolger aanwezig; op deze bedrijven ('stoppers') worden 178.312 melkkoeien gehouden (12% van alle melkkoeien op rond 16% van de melkveebedrijven).

### *Risico's (ontploffingsgevaar, ongedierte, brandgevaar)*

De experts zien vooral risico's bij technieken rond gasdicht maken of gasdicht opslaan (1, 2, 4) en waar met zuur wordt gewerkt (10).

### *Inpasbaarheid*

Bij de inpasbaarheid speelt een diversiteit aan factoren een rol, zoals:

- Effect op ammoniakemissie: gunstig effect bij de meeste maatregelen, neutraal bij drijfmest regelmatig mixen of beluchten (11) en bij methaanoxidatie door afzuiging (12). Wel wordt aangegeven dat soms aanvullende technieken zoals luchtwassers nodig zijn en dat het effect onzeker is en niet altijd als systeem wordt erkend (Rav). Deze evaluatie ging primair over methaanemissie, maar er gelden al specifieke eisen voor de ammoniakemissie die bepalend kunnen zijn voor de inpasbaarheid.
- Past binnen bestaande vergunning: dit is een duidelijk knelpunt voor vergisten (9), aanzuren (10), methaanoxidatie (12) en voor gasdichte opslag (3).
- Extra mestopslag/handling van mest. Koelen van drijfmest (8) en drijfmest mixen of beluchten (11) scoren hier gunstig, methaanoxidatie (12) scoort ook relatief gunstig, met de kanttekening dat dit afhangt van de nageschakelde techniek. Ongunstig scoren technieken met bijvoorbeeld compostering of scheiding, die aanvullende opslagen vereisen (3, 4, 5, 6, 7, 9), en aanzuren (10).
- Effect op koe en diermanagement is niet echt onderscheidend. De belangrijkste positieve factor die door de experts wordt genoemd is een verbetering van stalklimaat.
- Het grootste deel van de technieken zorgt voor extra arbeid of voegt complexiteit toe. Dit geldt het sterkst voor de vergister (9) en aanzuren (10).
- Combinatie met weidegang is in principe mogelijk voor alle technieken. Als er sprake is van een bewerking van de mest (composteren, vergisten) dan zal het streven wel eerder zijn om zoveel mogelijk mest te gaan verwerken, en dat kan remmend zijn voor weidegang (6, 9).

---

## Economie

Bij de economie zijn de volgende aspecten van belang:

- Benodigde investering: scoort alleen voor drijfmest mixen of beluchten (11) relatief gunstig. Vergisten (9) en aanzuren (10) scoren het meest ongunstig. Technieken die extra opslag of aanpassingen van opslag vragen scoren ongunstig.
- Operationele kosten en baten zijn niet echt onderscheidend, met uitzondering van aanzuren (10), dat duidelijk ongunstig scoort, met name omdat er geen baten tegenover staan, in tegenstelling tot bijvoorbeeld vergisting.
- Effect op mestafzet: dit is niet echt een onderscheidend aspect. Technieken met scheiding en/of compostering (4, 5, 6, 7, 9) scoren gunstiger.
- Waardevermindering van eerder gedane investeringen treedt vooral op als bestaande opslag (mogelijk) niet meer gebruikt kan worden (3, 4, 5, 6, 7, 12); waardevermindering treedt niet op als het bestaande systeem volledig intact blijft, zoals bij koelen (8), mixen of beluchten van drijfmest (11).
- Ontwikkelruimte wordt vooral gekoppeld aan ammoniakemissies omdat deze zijn gereguleerd. Dit aspect is gunstig voor technieken met dagontmesting vanaf een dichte vloer (3, 4, 5), afsluiten van mestkelders (1) en aanzuren (10).
- Vervaardingsmogelijkheden worden vooral gezien voor technieken met compostering, mestscheiding en biogas (6, 7, 9).

## Maatschappelijke acceptatie

De maatschappelijke acceptatie wordt vooral bepaald door:

- Beeld impact op dierenwelzijn: niet echt onderscheidend. Technieken met dagontmesting (3, 4, 5, 7) scoren relatief gunstig.
- Beeld natuurlijkheid: op dit aspect scoort scheiding/compostering (7) relatief gunstig; vergisting (9) en vooral aanzuren (10) scoren ongunstig.
- Inpasbaarheid en impact op landschap: technieken met scheiding/compostering scoren relatief gunstig door te verwachten positief effect op biodiversiteit (6, 7). Biogas (9) en met name aanzuren (10) scoren ongunstig. Ook de technieken met aanvullende oxidatietechnieken scoren ongunstig (2, 3, 4, 12).

## Remmende en stimulerende factoren

De aspecten die de adoptie kunnen remmen of juist stimuleren zijn samengevat in Bijlage 2. Aspecten zoals effect stopper en effect op koe en diermanagement en dierenwelzijn zijn niet meegenomen, omdat de diverse technieken op deze aspecten niet of nauwelijks van elkaar verschillen.

## 7.3 Stakeholderconsultatie

Deze paragraaf is een beknopte weergave van de resultaten van twee workshops (juli 2020) met veehouders en adviseurs over stal- en mestmaatregelen voor methaanemissiebeperking in de melkveehouderij. Deze zijn gehouden als een vervolg op de expertconsultatie en de Excel-evaluatie oefening. Het gaat hierbij om mogelijkheden voor het aanpassen van bestaande traditionele melkveestallen, met ligboxen en roostervloeren, zodat de emissie uit de mest wordt verkleind of weggenomen. Door middel van de workshops is uitgezocht welke kansen en belemmeringen er zijn vanuit het perspectief van de melkveehouder en andere (keten-)partijen om dergelijke technieken ook daadwerkelijk toe te passen ('adoptie'). Zie eventueel voor een uitgebreider verslag:

<https://www.integraalaanpakken.nl/nl/integraalaanpakken/show/resultaten-workshops-kansen-en-belemmeringen-voor-adoptie-van-technieken-voor-verlaging-methaanemissie-uit-mest-in-melkveestallen-.htm> (geraadpleegd maart 2022).

Onderzoekers van Wageningen Livestock Research (WLR) hebben samen met LTO en Wageningen Economic Research (WEcR) een tiental (combinaties van) technieken bekeken en hebben de meest kansrijke en praktijkrijpe geselecteerd en deze aan stakeholders voorgelegd voor toetsing. Daarbij is o.a. gekeken naar emissiereductie potentie en inpasbaarheid in gangbare melkveestallen.



---

In de workshops met de veehouders en adviseurs zijn de volgende vijf combinaties van technieken getoetst:

1. Mest koelen
2. Mest frequent verwijderen in combinatie met vergisten of buitenopslag
3. Mest gecontroleerd composteren
4. Mest mixen met lucht
5. Primaire scheiding + vaste mest

In de workshops met melkveehouders en bedrijfsadviseurs zijn deze vijf combinaties van technieken beoordeeld op hun kansen voor een brede adoptie in de praktijk. Dat leverde heldere inzichten en kritische reflecties op. De vier kernpunten daaruit zijn:

1. Belang van een integrale aanpak;
2. Kosten en baten;
3. Ruimtelijke inpassing;
4. Mestkwaliteit.

Ook in deze paragraaf is cijfermateriaal dat is gebruikt uit de Landbouwtelling en het BedrijvenInformatienet opgenomen in lichtgrijze kaders.

#### *Belang van een integrale aanpak*

De melkveehouders in de workshops waren in het algemeen zeer geïnteresseerd in nieuwe technieken en systemen. Methaanreductie heeft voor hen momenteel weliswaar geen prioriteit, maar technieken kunnen wel interessant zijn als ze op meerdere fronten voordeel opleveren, en bijvoorbeeld ook de ammoniakemissie beperken. Een integrale aanpak van duurzame oplossingen en stalsystemen maakt investeren in aanpassingen aantrekkelijker. De veehouders en adviseurs bevelen aan om in het vervolg van het onderzoek in te zetten op integrale oplossingen en daarbij specifiek ook te kijken naar andere aspecten, zoals mestkwaliteit. Er komt momenteel veel op boeren af, denk bijvoorbeeld aan stikstof, waardoor een nieuw doel als methaanemissiereductie de uitdaging voor hen nog groter maakt. Een voorspelbaar langetermijnbeleid voor deze uitdagingen is daarom belangrijk voor ondernemers, om weloverwogen investeringsbeslissingen te kunnen nemen.

#### *Kosten en baten*

Vanuit het perspectief van de deelnemers moet een nieuwe techniek liefst zo simpel mogelijk zijn. Het systeem met beluchting voldoet hier bijvoorbeeld aan. Arbeid is op veel melkveebedrijven een kritische factor, en een complexe techniek zoals mest vergisten of composteren kost al snel veel tijd aan beheer, onderhoud en reparaties. De deelnemers geven aan dat deze maatregelen niet voor elke boer geschikt zijn. Bovendien maakt het boeren meer afhankelijk van adviseurs en technici. Daartegenover staat dat sommige complexere technieken wel verwaardingsmogelijkheden bieden, zoals de productie van groen gas of compost.

Composteren wordt alleen kansrijk geacht voor een kleine groep melkveehouders die nu met hoge mestafzetkosten te maken hebben. Afzet van compost buiten de landbouw (bij hoveniers e.a.) kan voor een nog kleinere groep een interessante markt zijn.

*Maatregelen met hoge investeringskosten of die met andere technieken gecombineerd moeten worden zoals monovergisters, gecontroleerd composteren, methaanoxidatie, aanzuren, etc. zijn vooral geschikt voor intensieve/grote melkveebedrijven met ruimte op het bouwblok.*

Deze combinaties zijn vooral interessant voor intensieve bedrijven, met bijvoorbeeld minimaal 3 melkkoeien per ha cultuurgrond, die ook voldoende ruimte hebben op het bouwblok. 805 melkveebedrijven hebben minimaal 3,0 melkkoeien per hectare cultuurgrond. Op deze bedrijven worden 123.424 melkkoeien gehouden, dat is 8,3% van alle melkkoeien op melkveebedrijven. Hiervan hebben 705 bedrijven, met 87.813 melkkoeien (5,9%), minder dan 250 melkkoeien, en dus naar verwachting voldoende ruimte op het bouwblok. Daarnaast hebben 14 bedrijven, met 4.838 melkkoeien (0,3%), meer dan 250 melkkoeien en minimaal 6 maanden mestopslag voor runderdrijfmest buiten de stal, en dus naar verwachting ook voldoende ruimte op het bouwblok.

---

Bij een aantal technieken moet nog beter inzicht komen in de specifieke kosten, zoals in de exploitatiekosten van koeling. Daarnaast zijn nog niet alle systemen erkend als (ammoniak-) emissiearm en hebben dus nog geen Rav-status.

De voorgelegde technieken vragen investeringen en leiden tot hogere operationele kosten voor het primaire bedrijf, terwijl het nog onduidelijk is of er extra opbrengsten zullen zijn. De melkveehouders vinden dat ondersteuning in de vorm van bijvoorbeeld subsidies of CO<sub>2</sub>-credits een absolute voorwaarde is voor een brede toepassing in de praktijk.

#### *Ruimtelijke inpassing*

Het bouwblok is op veel bedrijven een beperkende factor voor extra opstallen en technieken buiten de stal. Daarom hebben de melkveehouders een voorkeur voor 'compacte' systemen, zoals beluchting en koeling, die weinig extra ruimte in beslag nemen. Mest frequent verwijderen en vergisten zijn mooie technieken voor de grotere bedrijven, met meer dan 200-300 melkkoeien, maar is voor het merendeel van de bedrijven momenteel bedrijfseconomisch niet haalbaar. Als alternatief werd naar voren gebracht dat 'gemiddelde' bedrijven samen zouden kunnen werken rond één monovergister.

#### *Ruimte op het bouwblok*

Een standaard maximaal bouwblok is circa 1,5 ha; bij 250 melkkoeien met bijbehorend jongvee is die 1,5 ha ongeveer gevuld met stallen, voeropslag, mestopslag, werktuigenberging en erf met woonhuis. De meeste bedrijven met minder dan 250 koeien zullen nog wel wat ruimte hebben voor nieuwe installaties.

Als we aannemen dat melkveebedrijven met minder dan 250 melkkoeien naar verwachting voldoende ruimte op het bouwblok zullen hebben, dan betreft dat 14.135 bedrijven van de 15.840 (2018), met 1.337.101 melkkoeien (89,7% van alle melkkoeien op melkveebedrijven).

De 441 melkveebedrijven met 250 melkkoeien of meer hebben 154.064 melkkoeien (10,3% van alle melkkoeien op melkveebedrijven). 70 van deze bedrijven, met 25.334 melkkoeien (1,7%) hebben minimaal 6 maanden mestopslag voor runderdrijfmest buiten de stal, en dus naar verwachting ook voldoende ruimte op het bouwblok. Echter, 364 van deze grote bedrijven, met 126.550 melkkoeien (8,5%), hebben minder dan 6 maanden mestopslag buiten de stal, en dus naar verwachting te weinig ruimte op het bouwblok.

#### *Vergisting alleen voor grotere bedrijven*

Onze inschatting is dat monovergisting alleen rendabel is, met subsidie, op relatief grote bedrijven met rond 250-300 melkkoeien. 351 melkveebedrijven hebben minimaal 270 melkkoeien. Op deze bedrijven zitten 130.752 melkkoeien, dat is 8,8% van alle melkkoeien op melkveebedrijven. Hiervan hebben slechts 55 bedrijven, met 21.416 melkkoeien (1,4%) minimaal 6 maanden mestopslag voor runderdrijfmest buiten de stal; van deze 55 bedrijven verwachten we dat er op het bouwblok voldoende ruimte is voor een vergistingsinstallatie.

De deelnemers waarschuwen voor de effecten op landschappelijke inpassing. Sommige ontwikkelingen zouden kunnen leiden tot een meer industriële uitstraling van de melkveehouderij, en daarmee het maatschappelijk imago kunnen verslechteren. Hierbij worden met name vergisters en affakkelininstallaties op het erf genoemd.

#### *Mestkwaliteit*

Melkveehouders zien het potentiële voordeel van systemen die verschillende stromen van mest produceren, in de praktijk vaak een dikke en een dunne fractie. Sommige meststromen passen beter bij bepaalde gewassen, andere passen beter bij afvoer van mineralen. Primaire scheiding wordt als kansrijk gezien. Tegelijkertijd is men kritisch op de huidige vloersystemen die primaire scheiding moeten realiseren. Zo is de verwachting dat de gier nog erg vervuild zal zijn met mest uit de dikke fractie. Ook worden de hoge kosten voor stro genoemd, dat nodig is voor stapelbare mest.

---

Mest- en bodemkwaliteit (biodiversiteit, waterbergend vermogen) zijn van belang en mestscheidingstechnieken dragen daar naar verwachting positief aan bij, bijvoorbeeld door 'rotting' van de mest tegen te gaan. Technieken waarbij mest verwerkt wordt, lijken minder goed te combineren met weidegang, denk aan vergistingsinstallaties. Als je zo'n mestverwerkingstechniek in huis hebt dan wil je eigenlijk ook zo veel mogelijk mest gebruiken om de techniek maximaal te benutten.

#### *Kansrijke technieken*

De melkveehouders en adviseurs beschouwen het koelen en vergisten van mest als kansrijk, waarbij vooral vergisten zich in de praktijk al heeft bewezen.

Men acht ook primaire scheiding en mixen met lucht relevant, maar bij deze technieken zijn er nog serieuze vragen of de emissies niet vooral worden verplaatst naar de opslag (bij primaire scheiding), of dat de ammoniakemissies juist zullen toenemen (bij mixen met lucht).

Sommige technieken of onderdelen daarvan moeten zich nog bewijzen. Deelnemers geven aan dat maatwerk per bedrijf belangrijk is, waarbij mestafzetkosten en bedrijfsgrootte een rol spelen. Er is niet één optimale oplossing voor alle melkveebedrijven. Veehouders hebben meer behoefte aan inzicht in de emissies en mogelijke aangrijpingspunten om de bedrijfsvoering integraal te verbeteren.

## 7.4 Conclusies

Het aanzicht van de melkveehouderij is aan het veranderen. Traditionele huisvestingsystemen met betonnen roostervloeren en mestkelders worden aangepast of gesloopt en er wordt nieuw gebouwd. De steeds strengere eisen voor de reductie van ammoniak is de katalysator van deze veranderingen. Ondertussen wordt ook de reductie van methaan relevant, hoewel daaromtrent nog geen harde eisen worden gesteld. In dit hoofdstuk hebben we naar een aantal combinaties van maatregelen gekeken die mogelijk inpasbaar kunnen zijn in bestaande stallen. Door middel van expert- en stakeholderconsultatie werd gereflecteerd op de kansen en belemmeringen voor de adoptie van deze combinaties.

De analyse van adoptiemogelijkheden laat zien dat mest koelen in of buiten de stal op bijna alle melkveebedrijven toepasbaar is. Een open vraag is het daarvoor benodigde energiegebruik. Ook het mixen van mest met lucht en primaire scheiding van dunne fractie en vaste mest is op vrijwel alle melkveebedrijven toe te passen. Echter, een groot nadeel van het mixen met lucht is dat inmiddels blijkt dat er geen reductie van methaan- en ammoniakemissie plaatsvindt met de beschikbare systemen. Bij primaire scheiding van urine en vaste mest is emissie uit de opslag een belangrijk aandachtspunt, hoe 'schoner' de dunne fractie hoe beter.

Het frequent verwijderen van mest is op veel bedrijven toepasbaar, echter, de combinaties met vergisten of composteren zijn maar voor heel weinig bedrijven interessant. Vooral het frequent verwijderen van mest (i.c.m. vloermaatregelen om ammoniakemissie tegen te gaan) en de verse mest vergisten is doeltreffend qua emissiereductie. Deze installaties vereisen echter hoge investerings- en onderhoudskosten die zonder subsidie of schaalvoordelen moeilijk rendabel zijn te maken. Een optie is om met kleinere en simpelere monovergisters te experimenteren. Ook is een interessante optie om met een aantal melkveebedrijven gezamenlijk gebruik te maken van een dergelijke installatie.

Bij maatregelen of combinaties hiervan waarin mestverwerking als een onderdeel van een verdienmodel wordt gezien, zoals bij vergisting, bestaat het risico dat implementatie ten koste van weidegang gaat.

Een nadeel van grote mestvergistingsinstallaties is dat het kan leiden tot een meer industriële uitstraling van de melkveehouderij, en daarmee tot een verslechtering van het maatschappelijk imago. Dat zou ook kunnen gelden voor (methaan)affakkelininstallaties op het erf.

---

Een ander aandachtspunt bij vergisting en compostering is dat weidegang daardoor verder onder druk kan komen te staan.

Een aantal combinaties is niet alleen interessant om emissies te reduceren maar ook om efficiënter met mest om te gaan. Het werken met verschillende fracties wordt als kansrijk gezien en sluit aan bij de wens om het gebruik van kunstmest te beperken.

In het algemeen vinden melkveehouders en adviseurs 'compacte' systemen, zoals beluchting en koeling, die weinig extra ruimte in beslag nemen interessanter. Ook hebben maatregelen de voorkeur die tegelijk de ammoniak- en de methaanemissie reduceren.

---

## 8 Conclusies en discussie

Op circa 80% van de melkveebedrijven lopen melkkoeien in de stal op een betonnen roostervloer waaronder drijfmest in een mestkelder wordt opgeslagen. Deze bedrijven, de maatschappij, de natuur en het klimaat hebben baat bij combinaties van maatregelen die de ammoniak- en de methaanemissie hieruit sterk kunnen reduceren.

Het primaire doel van dit onderzoek was het testen en bemeten van combinaties van maatregelen om de methaanemissie uit mest in bestaande stallen te kunnen reduceren. De grootste bron van methaan in een melkveebedrijf zijn de koeien zelf, dat wil zeggen de enterische methaanemissie. Om een inschatting te kunnen maken van het effect van de verschillende combinaties van maatregelen op de methaanemissie uit mest is ervoor gekozen om onder de roostervloeren en op de meststromen te meten in plaats van in de stal als geheel. Dit heeft ervoor gezorgd dat de meetapparatuur met verschillende omstandigheden en concentraties geconfronteerd werd. Daarbij zijn er innovatieve meetmethoden gebruikt (meetparaplu) die deels nog gevalideerd moeten worden. Daarom zijn de resultaten van dit onderzoek indicatief en zouden die met systematisch vervolgonderzoek getoetst moeten worden.

Er zijn verschillende combinaties van maatregelen die de methaanemissie uit mest kunnen reduceren. In dit onderzoek hebben we er een aantal bestudeerd. Er zijn echter zeker ook andere opties om deze doelstelling te bereiken, denk aan mest vergisten, mest aanzuren, etc. Hierbij een korte samenvatting van de belangrijkste bevindingen per combinatie van maatregelen die in dit rapport worden besproken.

### *Mest koelen*

De inzichten in de literatuur ten aanzien van de positieve resultaten van het verlagen van mesttemperatuur voor methaanemissiereductie zijn op basis van dit experiment op bedrijfsniveau moeilijk te valideren. Bij een van de bedrijven waren de case-control omstandigheden te ongunstig om conclusies te kunnen trekken. Bij het andere bedrijf werd een interessante (indicatieve) methaanemissiereductie waargenomen (> 40%) bij een verlaging van de temperatuur van gemiddeld maar een paar graden. Temperatuur verlagen is volgens de literatuur ook effectief om de ammoniakemissie te verlagen. Uit dit experiment kunnen we dit niet bevestigen. Vervolgonderzoek zal verdere inzichten hierover moeten opleveren.

Bij mest koelen kunnen de netto operationele kosten, dus het elektriciteitsverbruik, onderhoud etc. in de toekomst mogelijk gecompenseerd worden met de inkomsten gegenereerd door warmteproductie. Hiervoor moeten er nieuwe functies worden ontwikkeld (grasdrogen, mestdrogen, gebouwen verwarmen, etc.). In het onderzoek en ontwikkelingsproces van dit systeem zal dit moeten worden meegenomen.

Binnen het kader van dit onderzoek zijn inmiddels nieuwe systemen ontworpen en getest. Een 2.0 systeem om drijfmest in de mestkelder te koelen is bij bedrijf B1 in Hellingum tussen 2021 en 2022 getest en bemeten. De resultaten met betrekking tot de mesttemperatuur- en emissiereductie zijn volgens de voorlopige gegevens vergelijkbaar met de hier gerapporteerde resultaten. Er is ook een ander systeem ontworpen waarbij de mest uit de mestkelder naar een koelunit buiten de stal wordt verpompt en daarna weer gekoeld in de mestkelder teruggebracht. Dit externe mestkoelingssysteem is bij een ander melkveebedrijf in 2022 getest. De resultaten waren positief. Daarom is besloten om dit systeem op B1 te installeren. Eind 2022 werd dit systeem ingeregeld/geoptimaliseerd en vanwege de goede resultaten ten aanzien van het koelen van mest worden in 2023 emissiemetingen uitgevoerd. De resultaten van deze nieuwe experimenten zullen in 2023 en 2024 gepubliceerd worden.

### *Mest scheiden en dikke fractie gecontroleerd composteren*

Hier gaat het over een systeem dat niet ontwikkeld is om de methaanemissie te reduceren. Het principe gecontroleerd composteren van de dikke fractie is interessant om methaanvorming te stoppen vanwege het aerobe karakter van composteren. Dat mest snel uit de stal wordt gehaald en er een

---

luchtwasser bij de composteringstroommel geïnstalleerd kan worden maakt het ook interessant voor ammoniakemissiereductie. Echter met de wijze van scheiding van het hier bestudeerde systeem (d.w.z. een vijzelpers) wordt meer dan de helft van de OS in de dunne fractie naar een niet volledig gasdichte buitenopslag gebracht waar zeer waarschijnlijk alsnog methaanemissie plaatsvindt. Ontwikkelingen/verbeteringen rondom het scheiden van dikke en dunne fracties of het toepassen van maatregelen voor de dunne fractie (licht aanzuren, koelen, etc.) kunnen deze maatregel mogelijk aantrekkelijk maken voor het reduceren van emissies.

Ten aanzien van bestaande stallen kan een composteringstroommel met een vijzelpers ingepast worden. Daarbij is wel een pomp nodig om de drijfmest vanuit de mestkelder naar de vijzelpers/trommel te brengen. Verder moet er een opslag voor de dunne fractie gerealiseerd worden en een overdekte opslag voor de dikke fractie. Verder zal de stikstof voornamelijk in de dunne fractie zitten en moet de dikke fractie voornamelijk als bodemverbeteraar gezien worden met, zeer waarschijnlijk, een lagere bemestingswaarde. Bij het systeem is sprake van een stikstofverlies uit de trommel, stikstof die dus niet terecht komt in de fracties – maar eventueel wel in het afgevoerde spuiwater van de nageschakelde luchtwasser.<sup>22</sup> Dit betekent ook dat een gangbaar melkveebedrijf die dit systeem zou willen installeren tevens haar mesttoedienings- en mineralenbeleid (bemestingsplan) moet aanpassen.

#### *Mest mixen met lucht*

Mest mixen met lucht is niet hetzelfde als mest aerob maken. Het systeem is ontworpen en gecommmercialiseerd om de homogeniteit en de verpompbaarheid van mest te verbeteren. Op basis van dit experiment ligt de methaanemissie uit dit systeem hoger dan de controlekelder. Echter, theoretisch zou het mogelijk moeten zijn om bij het regelmatig inbrengen van veel lucht in de mest (dagelijks 1-3 m<sup>3</sup> lucht/1 m<sup>3</sup> drijfmest) de methaanemissie te reduceren. Het systeem is compact en relatief simpel te besturen en in te passen in bestaande stallen met betonnen roostervloeren en mestkelders. Wel moet mest-beluchten nog altijd met andere maatregelen gecombineerd moeten worden om de ammoniakemissie te reduceren – waardoor er meer aanpassingen nodig zouden zijn.

#### *Primaire mestscheiding + vaste mest*

Vaste mest wordt als goed ervaren voor bemesting, bodemverbetering en het levert minder emissies op dan de potstalmest of drijfmest die binnen stallen worden opgeslagen. Vanwege het slim omgaan met mestfracties en mineralen is het ook interessant vanuit een kringloopinvalshoek. Bij dit systeem moet ook aandacht aan de wijze van scheiding en dunne fractie worden besteed.

Het Kwatrijn, de stal waar dit onderzoek werd uitgevoerd, benadert de melkveehouderij op een andere manier dan een gangbaar bedrijf en er zijn aspecten die het integraal interessant maken zoals focus op dierenwelzijn, milieuvriendelijkheid en natuurinclusieve, biologische bedrijfsvoering, samenwerken met natuur-terreinbeheerder organisaties, etc. die vrij specifiek voor deze situatie zijn en moeilijk zijn in te passen in een bestaande stal. Deze hoeven uiteraard niet 1 op 1 gekopieerd/geïmplementeerd te worden. Er zijn wel veel aanpassingen nodig om dit systeem bij een bestaande stal te implementeren. Denk aan een dichte vloer, kelder voor de dunne fractie (bestaande kelders zouden als opslag voor deze fractie kunnen dienen), werken met stro en opslag van vaste mest, onder een dak, binnen of buiten de stal. Daarbij verandert het hele dier- en mestmanagementbeleid van het bedrijf. Globaal genomen bestaat de indruk dat dit type bedrijven maatschappelijk als wenselijk worden gezien.

~~~

Concluderend kan gezegd worden dat de melkveehouderij zich in de komende jaren verder zal moeten ontwikkelen en aanpassen. Niet alleen aan de hand van ontwikkelingen rondom zuivelproductie maar vooral vanwege maatschappelijke eisen en behoeften. Het aansluiten bij andere maatschappelijke trends zoals de energietransitie (mest koelen) en de kringlooptransitie (primaire mestscheiding + vaste mest), klimaatneutraal werken (denk aan methaan) en biodiversiteit versterken (ammoniakreductie, natuurinclusief) zullen deze ontwikkeling begeleiden.

---

<sup>22</sup> Bij een chemische luchtwasser is de hoeveelheid spuiwater circa 30 liter per kg afgevangen ammoniak. Hiervoor wordt rond 200 l water gebruikt (rond 170 l water verdampt) en rond 1,5 kg zwavelzuur. Dit spuiwater bestaat dan uit ammoniumsulfaat en nog een restant zwavelzuur waardoor dit als meststof gebruikt kan worden. Chemische wasstap - Kenniscentrum InfoMil (geraadpleegd oktober 2022).

---

De focus van dit onderzoek lag op de reductie van methaanemissie. Hoewel klimaatverandering op alle soorten niveaus al een impact heeft, is methaanemissie(reductie) een relatief nieuw onderwerp in de Nederlandse melkveehouderij, net als in de beleids- en kennisinfrastructuur daaromheen. In de afwezigheid van borgingssystemen (à la Rav-lijst voor ammoniakemissie) voor methaanemissie vormen alle investerings- en operationele kosten van deze maatregelen nu een barrière voor hun verdere ontwikkeling en implementatie. Maatregelen die wel een effect op de ammoniakemissie hebben zoals primaire mestscheiding i.c.m. vaste mest en secundaire mestscheiding i.c.m. gecontroleerd composteren zijn daardoor, in principe, kansrijker. Waarbij mest koelen met aanvullende maatregelen geüpgraded kan worden. Zodra methaanemissiereductie beloond, of vereist wordt dan is deze combinatie van maatregelen de moeite waard om door te ontwikkelen.

---

# Dankwoord

Graag willen we de volgende mensen bedanken voor het helpen met het uitvoeren dit onderzoek.

Wageningen Livestock Research: Klaas Blanken, Jos Huis in 't Veld, Yvo Goselink en Nico Ogink.

Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit.

LTO-projecten: Ton van Korven en Kees Kroes.

LeAF BV, Ravebo BV.

Mest koelen: Jan Pieter en Margaretha van Tilburg (Zandhoeve Holsteins), Wouter en Christina Schep (Melkveehouderij Ballingheim VOF), Jeroen van der Meijden (Geothermica), Rob Jacobs (L'orèl Consultancy) en Erwin de Boer.

Mest scheiden en dikke fractie gecontroleerd composteren: Auke Talsma (VOF Talsma), Mavasol BV.

Mest mixen met lucht: Familie Meijer, Vogelsang BV.

Primaire scheiding + vaste mest: Sjaak Sprangers (Het Kwatrijn in Kaatsheuvel).



---

# Literatuur

- Aarnink, A.J.A. & Elzing, A. (1998). Dynamic model for ammonia volatilization in housing with partially slatted floors, for fattening pigs. *Livestock Production Science*, 53(2), 153-169. doi: 10.1016/S0301-6226(97)00153-X.
- Amon, B., Amon, T., Boxberger, J. & Alt, C. (2001). Emissions of NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> from dairy cows housed in a farmyard manure tying stall (housing, manure storage, manure spreading). *Cycling in Agroecosystems*, 60, 103-113. doi: 10.1023/A:1012649028772.
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Amon, T. & Zechmeister-Boltenstern, S. (2006 a). Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112(2-3), 153-162. doi: 10.1016/j.agee.2005.08.030.
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Bodiroza, V., Pötsch, E. & Zollitsch, W. (2006 b). Optimising methane yield from anaerobic digestion of manure: Effects of dairy systems and of glycerine supplementation. *International Congress Series*, 1293, 217-220. doi: 10.1016/j.ics.2006.03.007.
- Baldé, H., VanderZaag, A.C., Burt, S., Evans, L., Wagner-Riddle, C., Desjardins, R.L. & MacDonald, J.D. (2016). Measured versus modeled methane emissions from separated liquid dairy manure show large model underestimates. *Agriculture, ecosystems & environment*, 230, 261-270. doi: 10.1016/j.biortech.2016.06.031.
- Baral, K.R., Jégo, G., Amon, B., Bol, R., Chantigny, M. H., Olesen, J. E. & Petersen, S. O. (2018). Greenhouse gas emissions during storage of manure and digestates: Key role of methane for prediction and mitigation. *Agricultural Systems*, 166(July), 26-35. doi: 10.1016/j.agsy.2018.07.009.
- Bell, M.J., Wall, E., Simm, G. & Russell, G. (2011). Effects of genetic line and feeding system on methane emissions from dairy systems. *Animal Feed Science and Technology*, 166, 699-707. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2011.04.049.
- Borhan, M.S., Mukhtar, S., Capareda, S. & Rahman, S. (2012). Greenhouse Gas Emissions from Housing and Manure Management Systems at Confined Livestock Operations. In L.F. Marmolejo Rebellon (Ed.), *Waste Management - An Integrated Vision* (pp. 259-296). InTech. doi: 10.5772/51175.
- Calvet, S., Hunt, J. & Misselbrook, T.H. (2017). Low frequency aeration of pig slurry affects slurry characteristics and emissions of greenhouse gases and ammonia. *Biosystems Engineering*, 159, 121-132. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.04.011.
- Cárdenas, A., Ammon, C., Schumacher, B., Stinner, W., Herrmann, C., Schneider, M., Weinrich, S., Fischer, P., Amon, T. & Amon, B. (2021). Methane emissions from the storage of liquid dairy manure: Influences of season, temperature and storage duration. *Waste Management*, 121, 393-402. doi:10.1016/j.wasman.2020.12.026.
- CDM (2017). CDM-advies 'Definitie en interpretatie van potstalrest'. Commissie Deskundigen Meststoffenwet. Retrieved from 3bd3e1aa-488e-4a77-ae1e-1a79cd6dfa1d\_1716199\_Oene Oenema bijlage 1.pdf (wur.nl).
- Chadwick, D., Sommer, S., Thorman, R., Fanguero, D., Cárdenas, L., Amon, B. & Misselbrook, T.H. (2011). Manure management: Implications for greenhouse gas emissions. *Animal Feed Science and Technology*, 166-167, 514-531. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2011.04.036.
- Dalby, F.R., Hafner, S.D., Petersen, S.O., VanderZaag, A.C., Habtewold, J., Dunfield, K., Chantigny, M.H. & Sommer, S.G. (2021). Understanding methane emission from stored animal manure: A review to guide model development. *Journal of Environmental Quality*, 50 (4), 817-835. doi: 10.1002/jeq2.20252.
- Dawson, C.J. & Hilton, J. (2011). Fertiliser availability in a resource-limited world: Production and recycling of nitrogen and phosphorus. *Food Policy*, 36(1), S14-S22. doi: 10.1016/j.foodpol.2010.11.012.
- De Brugh, A.M. (2016). Koeien geven wat minder gas. NRC. Retrieved from www.nrc.nl/nieuws/2016/05/14/koeien-geven-wat-minder-gas-2277476-a636532.
- De Buissonjé, F.E. (2013). *Rendabele energiewinning uit mestverwerking op boerderijschaal. Onderzoek aan de Bedding master*. Wageningen UR Livestock Research.
- De Vries, J.W., Groenestein, C.M., Schröder, J.J., Hoogmoed, W.B., Sukkel, W., Groot Koerkamp, P.W.G. & De Boer, I.J.M. (2015). Integrated manure management to reduce environmental impact: II. Environmental impact assessment of strategies. *Agricultural Systems*, 138, 88-99. doi: 10.1016/j.agsy.2015.05.006.

- De Vries, J.W., Vinken, T.M.W.J., Hamelin, L. & De Boer, I.J.M. (2012). Comparing environmental consequences of anaerobic mono- and co-digestion of pig manure to produce bio-energy – a life cycle perspective. *Bioresource Technology*, 125, 239-248. doi: 10.1016/j.biortech.2012.08.124.
- De Vries, M., Vellinga, T.V., Hoving, I., Van Middelkoop, J., Ten Napel, J., Verhagen, J. & Van der Weide, R. (2018). *Klimaatlimme melkveehouderij: Een routekaart voor implementatie van mitigatie- en adaptatiemaatregelen*. Wageningen Livestock Research: Rapport 1131.
- Deru, J., Hensen, A., Van Dinther, D., Frumau, A., Van den Bulk, P. & Antonissen, H. (2018). *Oriënterende ammoniak- en methaanmetingen in de Kwatrijnstal*. Louis Bolk Instituut: 2018-021 LbD.
- Elsgaard, L., Olsen, A.B. & Petersen, S.O. (2016). Temperature response of methane production in liquid manures and co-digestates. *Science of the Total Environment*, 539, 78-84. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.145.
- Evers, A.G., de Haan, M.H.A., De Buissonjé, F.E. & Verloop, K. (2010). *Perspectief mestscheiding op melkveebedrijven*. Wageningen UR Livestock Research: Rapport 421.F
- Fangueiro, D., Hjorth, M. & Gioelli, F. (2015). Acidification of animal slurry – a review. *Journal of Environmental Management*, 149, 46–56. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.10.001.
- Geissler, B., Hermann, L., Mew, M.C. & Steiner, G. (2018). Striving Toward a Circular Economy for Phosphorus: The Role of Phosphate Rock Mining. *Minerals*, 8(9), 395. doi: 10.3390/min8090395
- Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. & Tempio, G. (2013). *Tackling climate change through livestock - A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- GRA (2013). Reducing greenhouse gas emissions from livestock: Best practice and emerging options. In: Livestock Research Group (LRG) & Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases (GRA). Ag#3 Irg-sai-livestock-mitigation\_web2.pdf.
- Groenestein, C.M., Mosquera, J. & Melse, R.W. (2016). *Methaanemissie uit mest; Schatters voor biochemisch methaan potentieel (BMP) en methaanconversiefactor (MCF)*. Wageningen Livestock Research: Rapport 961.
- Groenestein, C.M., Mosquera, J. & Van der Sluis, S.M. (2012). Emission factors for methane and nitrous oxide from manure management and mitigation options. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 9(1), 139-146. doi: 10.1080/1943815X.2012.698990.
- Groenestein, C.M., Huijsmans, J.F.M. & Schils, R.L.M. (2010). *Emissies van broeikasgassen, ammoniak, fijn stof en geur in de mestketen*. Wageningen UR Livestock Research: Rapport 248.
- Groenestein, K., Melse, R., Mosquera, J. & Timmermans, M. (2020). *Effect mestvergisting op de emissies van broeikasgassen uit mest van melkvee: een literatuur- en scenariostudie*. Wageningen Livestock Research: Rapport 1235.
- Groot Koerkamp, P.W.G., Metz, J.H.M., Uenk, G.H., Phillips, V.R., Holden, M.R., Sneath, R.W., Short, J.L., White, R.P., Hartung, J., Seedorf, J., Shroder, M., Linkert, K.H., Pedersen, S., Takai, H., Johnsen, J.O. & Wathes, C. M. (1998). Concentrations and emissions of ammonia in livestock buildings in northern Europe. *J. Agric. Eng. Res*, 70(1), 79-95. doi: 10.1006/jaer.1998.0275.
- Gustafsson, G., Jeppsson, K., Hultgren, J. & Sanno, J.-O. (2005). Techniques to Reduce the Ammonia Emission from a Cowshed with Tied Dairy Cattle. *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal*. Manuscript BC 04 010. Vol. VII. November, 2005.
- Habewold, J., Gordon, R., Sokolov, V., VanderZaag, A., Wagner-Riddle, C. & Dunfield, K. (2018). Reduction in Methane Emissions From Acidified Dairy Slurry is Related to Inhibition of Methanosarcina Species. *Frontiers in Microbiology*, 8. doi: 10.3389/fmicb.2018.02806.
- Hao, X., Chang, C., Larney, F.J. & Travis, G.R. (2001). Greenhouse gas emissions during cattle feedlot manure composting. *Journal of Environmental Quality*, 30(2), 376-386. doi: 10.2134/jeq2001.302376x.
- Hoeksma, P., Mosquera, J. & Melse, R.W. (2012). *Monitoring methane and nitrous oxide reduction by manure treatment*. Wageningen UR Livestock Research: Rapport 627.
- Hristov, A.N., Oh, J., Giallongo, F., Frederick, T.W., Harper, M.T., Weeks, H.L., Branco, A.F., Moate, P.J., Deighton, M.H., Williams, S.R.O., Kindermann, M. & Duval, S. (2015). An inhibitor persistently decreased enteric methane emission from dairy cows with no negative effect on milk production. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(34), 10663–10668. doi: 10.1073/pnas.1504124112.
- Hulsman, J., Milta, S., & Schuman, E. (2020). *BMP en AMP bepalingen*. LeAF: LeAF 20418.
- Im, S., Mostafa, A. & Kim, D.-H. (2021). Use of citric acid for reducing CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>S emissions during storage of pig slurry and increasing biogas production: Lab- and pilot-scale test, and assessment. *Science of the Total Environment*, 753, 142080. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142080.
- Im, S., Petersen, S.O., Lee, D. & Kim, D.-H. (2020). Effects of storage temperature on CH<sub>4</sub> emissions from cattle manure and subsequent biogas production potential. *Waste Management*. doi: 10.1016/j.wasman.2019.09.036).

- Jayanegara, A., Sarwono, K.A., Kondo, M., Matsui, H., Ridla, M. Laconi, E.B. & Nahrowi (2018). Use of 3-nitrooxypropanol as feed additive for mitigating enteric methane emissions from ruminants: a meta-analysis. *Italian Journal of Animal Science*, 17(3), 650-656. doi: 10.1080/1828051X.2017.1404945.
- Jiang, Y., Zhang, Y., Wang, S., Wang, Z., Liu, Y., Hu, Z. & Zhan, X. (2021). Improved environmental sustainability and bioenergy recovery through pig manure and food waste on-farm co-digestion in Ireland. *Journal of Cleaner Production*, 280, 125034. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125034.
- Klop, G. (2016). *Low Emission Feed: Using feed additives to decrease methane production in dairy cows*. PhD thesis. Animal Nutrition Group; Wageningen University & Research.
- Llonch, P., Haskell, M.J., Dewhurst, R.J. & Turner, S.P. (2017). Review: Current available strategies to mitigate greenhouse gas emissions in livestock systems: An animal welfare perspective. *Journal Animal*, 11(2), 274 - 284. doi: 10.1017/S1751731116001440.
- Manzanilla-Pech, C.I.V., De Haas, Y., Hayes, B.J., Veerkamp, R.F., Khansefid, M., Donoghue, K.A., Arthur, P.F. & Pryce, J. E. (2016). Genomewide association study of methane emissions in Angus beef cattle with validation in dairy cattle. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 94(10), 4151 - 4166. doi: 10.2527/jas2016-0431.
- Martinez-Fernandez, G., Duval, S., Kindermann, M., Schirra, H.J., Denman, S.E. & McSweeney, C.S. (2018). 3-NOP vs. Halogenated Compound: Methane Production, Ruminal Fermentation and Microbial Community Response in Forage Fed Cattle. *Frontiers in Microbiology*, 9(1582). doi: 10.3389/fmicb.2018.01582.
- Martinez, J., Dabert, P., Barrington, S. & Burton, C. (2009). Livestock waste treatment systems for environmental quality, food safety, and sustainability. *Bioresource Technology*, 100, 5527-5536. doi: 10.1016/j.biortech.2009.02.038.
- Martinez, J., Guiziou, F., Peu, P. & Gueutier, V. (2003). Influence of treatment techniques for pig slurry on methane emissions during subsequent storage. *Biosystems Engineering*, 85(3), 347-354. doi: 10.1016/S1537-5110(03)00067-9.
- Massé, D.I., Jarret, G., Hassanat, F., Benchaar, C. & Cata Saady, N.M. (2016). Effect of increasing levels of corn silage in an alfalfa-based dairy cow diet and of manure management practices on manure fugitive methane emissions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 221, 109-114. doi: 10.1016/j.agee.2016.01.018.
- Massé, D.I., Masse, L., Claveau, S., Benchaar, C. & Thomas, O. (2008). Methane emissions from manure storages. *Transactions of the ASABE*, 51(5), 1775-1781. doi: 10.13031/2013.25311.
- McVoitte, W.P.A. & Clark, O.G. (2019). The effects of temperature and duration of thermal pretreatment on the solid-state anaerobic digestion of dairy cow manure. *Heliyon*, 5(7), e02140. doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02140.
- Melse, R.W. & Van der Werf, A. (2005). Biofiltration for Mitigation of Methane Emission from Animal Husbandry. *Environ. Sci. Technol.*, 39, 5460-5468. doi: 10.1021/es048048q.
- Mirzaei-Aghsaghali, A. & Maheri-Sis, N. (2016). Factors affecting mitigation of methane emission from ruminants: Microbiology and biotechnology strategies. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 4(1), 22-31. doi: 10.14269/2318-1265/jabb.v4n1p22-31.
- Monteny, G.J. & Keuskamp, J. (2022). *Laboratory case/control test of three additives on their reduction of NH<sub>3</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from dairy cow manure*. MEET-ID. MEET-ID RAPPORT 2022-001.
- Monteny, G.J., Van Well, E., Bos, A.P. & Puente-Rodríguez, D. (2021). *Case/control-onderzoek naar de vermindering van de methaan- en ammoniakemissie uit melkveemest door toepassing van mestadditieven*. Meet-ID, Wageningen Livestock Research & CLM Onderzoek en Advies. Retrieved from: [http://meetid.nl/wp-content/uploads/2021/07/Meet-ID-rapport-2021-002\\_pottenproef-FINAL\\_3-juni-2021.pdf](http://meetid.nl/wp-content/uploads/2021/07/Meet-ID-rapport-2021-002_pottenproef-FINAL_3-juni-2021.pdf).
- Mosquera, J., Hofschreuder, P. & Hol, J.M.G. (2005). *Onderzoek naar de emissies van een natuurlijk geventileerde potstal voor melkvee II; Mestopslag buiten de stal*. Agrotechnology & Food Innovations B.V.: Rapport 325.
- Mosquera, J., Kasper, G.J., Blanken, K., Dousma, F. & Aarnink, A.J.A. (2010). *Ontwikkeling snelle meetmethode ter bepaling van ammoniakemissiereductie van vloergebonden maatregelen*. Wageningen UR Livestock Research. Rapport 291.
- Mosquera, J., Ploegaert, J.P.M. & Kupers G.C.C. (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.
- OECD/FAO. (2020). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2020-2029*. FAO, Rome/OECD, Paris. doi: 10.1787/1112c23b-en.
- Oonk, H., Koopmans, J., Geck, C., Peters, B. & Van Bergen, J. (2015). Methane emission reduction from storage of manure and digestate-slurry. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 12(1), 121-137. doi: 10.1080/1943815X.2015.1096796.
- Ouweltjes, W., Puente-Rodríguez, D. & Hopster, H. (in voorbereiding). Consequences of low-emission floor design in cow sheds on dairy cow welfare.

- Patra, A., Park, T., Kim, M. & Yu, Z. (2017). Rumen methanogens and mitigation of methane emission by anti-methanogenic compounds and substances. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 8(13). doi: 10.1186/s40104-017-0145-9.
- Petersen, S.O., Andersen, A.J. & Eriksen, J. (2012). Effects of Cattle Slurry Acidification on Ammonia and Methane Evolution during Storage. *Journal of Environmental Quality*, 41(1), 88–94. doi: 10.2134/jeq2011.0184.
- Petersen, S.O., Hojberg, O., Poulsen, M., Schwab, C. & Eriksen, J. (2014). Methanogenic community changes, and emissions of methane and other gases, during storage of acidified and untreated pig slurry. *Journal of Applied Microbiology*, 117(1), 160-172. doi: 10.1111/jam.12498.
- Pinares-Patiño, C.S., Ebrahimi, S.H., McEwan, J.C., Dodds, K.G., Clark, J.P. & Luo, D. (2011). Is rumen retention time implicated in sheep differences in methane emission? *Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production*, 71, 219-222.
- Puente-Rodríguez, D., Bos, A.P. & Vonk, J. (2021). Het Kwatrijn in de kringlooptransitie. Wageningen Livestock Research. <https://www.wur.nl/nl/show/Het-Kwatrijn-in-de-kringlooptransitie.htm>.
- Puente-Rodríguez, D., Gollenbeek, L.R., Verdoes, N. & Bos, A.P. (2022). *Perspectief van het aanzuren van mest in Nederland om methaan- en ammoniakemissie te reduceren*. Wageningen Livestock Research: Rapport 1375.
- Puente-Rodríguez, D. & Groenestein, C.M. (2019). *Duurzaamheids-ethische toetsing van methaanreducerende technische maatregelen: Evaluatie van technische maatregelen ten aanzien van de integrale verduurzaming van de veehouderij*. Wageningen Livestock Research: Rapport 1178.
- Reisinger, A., & Clark, H. (2017). How much do direct livestock emissions actually contribute to global warming? *Global Change Biology*, 24(4), 1749-1761. doi: 10.1111/gcb.13975.
- Rodhe, L.K.K., Ascue, J., Willén, A., Persson, B.V. & Nordberg, Å. (2015). Greenhouse gas emissions from storage and field application of anaerobically digested and non-digested cattle slurry. *Agriculture, ecosystems & environment*, 199, 358-368. doi: 10.1016/j.agee.2014.10.004.
- Ruysenaars, P.G., Van der Net, L., Coenen, P.W.H.G., Rienstra, J.D., Zijlema, P.J., Arets, E.J.M.M., Baas, K., Dröge, R., Geilenkirchen, G., 't Hoen, M., Honig, E., Van Huet, B., Van Huis, E.P., Koch, W.W.R., te Molder, R.M., Montfoort, J.A. & Van der Zee, T. (2022). *Greenhouse gas emissions in the Netherlands 1990–2020. National Inventory Report 2022*. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Ministry of Health, Welfare and Sport. doi: 10.21945/RIVM-2022-0005.
- Safley, L. M. & Westerman, P. W. (1994). Low-temperature digestion of dairy and swine manure. *Bioresource Technology*, 47, 165–171. doi: 10.1016/0960-8524(94)90116-3.
- Schils, R.L.M. (2016). *30 vragen en antwoorden over zwavel*. Alterra, Wageningen UR. doi: 10.18174/392373.
- Schoumans, O.F., Ehlert, P.A.I., Hanegraaf, M.C., Römkens, P.F.A.M., Pustjens, A.M., De koeijer, T.J., De Boer, H.C., Niehuis, C., Kortstee, H. & Smit, A.B. (2019). *Development of a conceptual framework to evaluate organic fertilisers; Assessment on soil quality and agronomic, environmental and economic aspects*. Wageningen Environmental Research: Rapport 2964.
- Schuman, E. & Hulsman, J. (2021). *2 BMP en 2 AMP bepalingen serie 3 (dec)*. LeAF: Rapport 20432.
- Schuman, E., Hulsman, J. & Melita, S. (2021). *BMP en AMP bepaling 2 mestmonsters (serie 2)*. LeAF: Rapport 20419.
- Šebek, L.B., Mosquera, J. & Bannink, A. (2016). *Rekenregels voor de enterische methaanemissie op het melkveebedrijf en reductie van de methaanemissie via mest-handling; het handelingsperspectief van het voerspoor inzichtelijk maken met de Kringloopwijzer*. Wageningen Livestock Research, Wageningen University & Research: Rapport 976.
- Sherlock, R.R., Sommer, S.G., Khan, R.Z., Wood, C.W., Guertal, E.A., Freney, J.R., Dawson, C.O. & Cameron, K.C. (2002). Emission of ammonia, methane and nitrous oxide from pig slurry applied to a pasture in New Zealand. *Journal of Environmental Quality*, 31(5), 1491-1501. doi: 10.2134/jeq2002.1491.
- Sommer, S.G., Møller, H.B. & Petersen, S.O. (2001). The reduction of greenhouse gases from manure and organic waste using digestion and biogas production (in Deens). Denmark: Danmarks JordbrugsForskning.
- Sommer, S.G., Petersen, S.O. & Møller, H.B. (2004). Algorithms for calculating methane and nitrous oxide emissions from manure management. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 69, 143–154. doi: 10.1023/B:FRES.0000029678.25083.fa.
- Thompson, A.G., Wagner-Riddle, C. & Fleming, R. (2004). Emissions of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> during the composting of liquid swine manure. *Environmental Monitoring and Assessment*, 91(1-3), 87–104. doi: <https://doi.org/10.1023/B:EMAS.0000009231.04123.2d>.
- Timmerman, M., Van Riel, J.W., Bisschops, I. & Van Eekert, M. (2009). *Optimaliseren van mestvergisting*. Animal Sciences Group, Wageningen UR: Rapport 243.

- 
- Trimmer, J.T. & Guest, J.S. (2018). Recirculation of human-derived nutrients from cities to agriculture across six continents. *Nature Sustainability*, 1, 427–435. doi: 10.1038/s41893-018-0118-9.
- Troy, S.M., Duthie, C.A., Hyslop, J.J., Roehe, R., Ross, D.W., Wallace, R.J., Waterhouse, A. & Rooke, J.A. (2015). Effectiveness of nitrate addition and increased oil content as methane mitigation strategies for beef cattle fed two contrasting basal diets. *Journal of Animal Science* 93(4), 1815-1823. doi: 10.2527/jas.2014-8688.
- Vaddella, V.K., Ndegwa, P.M., Joo, H.S. & Ullman, J.L. (2010). Impact of separating dairy cattle excretions on ammonia emissions. *Journal of Environmental Quality*, 39(5). doi: 10.2134/jeq2009.0266.
- Van Bruggen, C., Bannink, A., Groenestein, C.M., Huijsmans, J.F.M., Lagerwerf, L.A., Luesink, H.H., Ros, M.B.H., Velthof, G.L., Vonk, J. & Van der Zee, T. (2021). *Emissies naar lucht uit de landbouwberekening met NEMA voor 1990-2019*. WOt-technical report 203. doi: 10.18174/544296.
- Van der Stelt, B., Temminghoff, E.J.M., Van Vliet, P.C.J., & Van Riemsdijk, W.H. (2007). Volatilization of ammonia from manure as affected by manure additives, temperature and mixing. *Bioresource Technology*, 98(18), 3449-3455. doi: 10.1016/j.biortech.2006.11.004.
- Van Dooren, H.J.C., Bokma, S. & Ogink, N.W.M. (2019). *Ammoniakemissie tijdens frequent mixen van drijfmest met lucht*. Wageningen Livestock Research: Rapport 1170.
- Van Dooren, H.J.C., Ogink, N.W.M., Van Riel, J.W., Mosquera, J. & Zonderland, J.L. (2019). *Beïnvloeding van de ammoniakemissie uit melkveestallen met roostervloer door beweiding; Onderzoek op Dairy Campus*. Wageningen Livestock Research: Rapport 1330.
- Van Middelkoop, J.C. & Holshof, G. (2017). Nitrogen Fertilizer Replacement Value of Concentrated Liquid Fraction of Separated Pig Slurry Applied to Grassland. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(10), 1132-1144. doi:10.1080/00103624.2017.1323101.
- Vellinga, T.V. & De Vries, M. (2018). Effectiveness of climate change mitigation options considering the amount of meat produced in dairy systems. *Agricultural Systems*(162), 136-144. doi: 10.1016/j.agsy.2018.01.026.
- Vista (2012). *Het Kwatrijn, de melkveestal van de toekomst: stalontwerp en landschappelijke inpassing; achtergrondrapport bij de SBIR haalbaarheidsstudie Fase 1*. Vista.
- Warner, D., Bannink, A., Hatew, B., Van Laar, H. & Dijkstra, J. (2017). Effects of grass silage quality and level of feed intake on enteric methane production in lactating dairy cows. *American Society of Animal Science*, 95, 3687–3699. doi: 10.2527/jas2017.1459.
- Wightman, J.L. & Woodbury, P.B. (2016). New York Dairy Manure Management Greenhouse Gas Emissions and Mitigation Costs (1992–2022). *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 266-275. doi: 10.2134/jeq2014.06.0269.
- Willeghems, G., De Clercq, L., Michels, E., Meers, E. & Buysse, J. (2016). Can spatial reallocation of livestock reduce the impact of GHG emissions? *Agricultural Systems*, 149, 11-19. doi: 10.1016/j.agsy.2016.08.006.
- Wu, W., Tong, Z., Zhang, G., Malkawi, A., Wang, X. & Benner, J. (2019). An energy efficient hydraulic system to cool manure and reduce ammonia emissions from livestock buildings. *Journal of Cleaner Production*, 235, 920-929. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.07.036.
- Zeeman, G. (1991). *Mesophilic and psychrophilic digestion of liquid manure*. (PhD thesis). Wageningen University, Retrieved from <https://edepot.wur.nl/202851>.
- Zeeman, G. (1994). Methane production/emission in storages for animal manure. *Fertilizer Research*, 37, 207-211.

# Bijlage 1 – Gebruikte analysemethoden WLR sevicelab en resultaten mestmonsters

Overzicht NEN nummers bij de gebruikte analysemethoden van het WLR servicelab

| NEN-nr | Versie           | Titel                                                                                                                                                                    | Webadres                                                                                   |
|--------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7430   | NEN 7430:1998 nl | Dierlijke mest en mestproducten - Monstervoorbehandeling door homogeniseren - Drijfmest                                                                                  | <a href="http://www.nen.nl/nen-7430-1998-nl-31959">www.nen.nl/nen-7430-1998-nl-31959</a>   |
| 7431   | NEN 7431:1998 nl | Dierlijke mest en mestproducten - Monstervoorbehandeling door mengen, drogen en malen - Stapelbare mest                                                                  | <a href="http://www.nen.nl/nen-7431-1998-nl-31962">www.nen.nl/nen-7431-1998-nl-31962</a>   |
| 7432   | NEN 7432:1998 nl | Dierlijke mest en mestproducten - Bepaling van de gehalten aan droge stof en organische stof - Gravimetrische methode                                                    | <a href="http://www.nen.nl/nen-7432-1998-nl-31721">www.nen.nl/nen-7432-1998-nl-31721</a>   |
| 7433   | NEN 7433:2020 nl | Dierlijke mest en mestproducten - Monstervoorbehandeling voor de bepaling van stikstof, fosfor en kalium - Ontsluiting met zwavelzuur, waterstofperoxide en kopersulfaat | <a href="http://www.nen.nl/nen-7433-2020-nl-270229">www.nen.nl/nen-7433-2020-nl-270229</a> |
| 7434   | NEN 7434:1998 nl | Dierlijke mest en mestproducten - Bepaling van het gehalte aan stikstof in destruaten                                                                                    | <a href="http://www.nen.nl/nen-7434-1998-nl-31723">www.nen.nl/nen-7434-1998-nl-31723</a>   |
| 7435   | NEN 7435:2019 nl | Dierlijke mest en mestproducten - Bepaling van het gehalte aan fosfor in destruaten                                                                                      | <a href="http://www.nen.nl/nen-7435-2019-nl-265336">www.nen.nl/nen-7435-2019-nl-265336</a> |
| 7436   | NEN 7436:1998 nl | Dierlijke mest en mestproducten - Bepaling van het gehalte aan kalium in destruaten                                                                                      | <a href="http://www.nen.nl/nen-7436-1998-nl-31728">www.nen.nl/nen-7436-1998-nl-31728</a>   |
| 7438   | NEN 7438:1998 nl | Dierlijke mest en mestproducten - Bepaling van het gehalte aan ammoniumstikstof - Titrimetrische methode                                                                 | <a href="http://www.nen.nl/nen-7438-1998-nl-35428">www.nen.nl/nen-7438-1998-nl-35428</a>   |

**Tabel B1.1** Mestanalyses mestkoeling bedrijf B1

|         |                    |        |             | totaal-<br>N<br>g/kg | ammonium-<br>N<br>g/kg | totaal-<br>P<br>g/kg | droge<br>stof<br>g/kg | K<br>g/kg | as<br>g/kg | pH   |
|---------|--------------------|--------|-------------|----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------|------|
| 20/1405 | gekoelde mest      | Hellum | 3/11/2<br>0 | 3,48                 | 1,56                   |                      | 76,4                  |           |            | 7,3  |
| 20/1404 | referentie mest    |        |             | 3,32                 | 1,53                   |                      | 72,2                  |           |            | 7,4  |
| 20/1106 | gekoelde mest      | Hellum | 16/9/2<br>0 | 3,87                 | 1,52                   |                      | 93,4                  |           |            | 7,3  |
| 20/1105 | referentie mest    |        |             | 3,63                 | 1,62                   |                      | 78,0                  |           |            | 7,4  |
| 20/0868 | gekoelde mest      | Hellum | 21/7/2<br>0 | 3,50                 | 1,42                   |                      | 119,8                 |           |            | 7,2  |
| 20/0869 | referentie mest    |        |             | 3,37                 | 1,36                   |                      | 89,9                  |           |            | 7,1  |
| 20/0627 | gekoelde mest      | Hellum | 19/5/2<br>0 | 3,71                 | 1,80                   | 0,47                 | 83,3                  | 4,24      | 19,6       | 6,87 |
| 20/0626 | Referentie<br>mest |        |             | 3,55                 | 1,71                   | 0,47                 | 81,8                  | 3,82      | 19,5       | 6,86 |
| 20/0299 | gekoelde mest      | Hellum | 4/3/20<br>0 | 3,44                 | 1,53                   | 0,44                 | 81,2                  | 3,69      | 19,8       | 7,1  |
| 20/0300 | referentie mest    |        |             | 3,40                 | 1,58                   | 0,42                 | 80,3                  | 4,07      | 17,9       | 7,3  |
| 20/0061 | gekoelde mest      | Hellum | 15/1/2<br>0 |                      | 1,58                   |                      | 78,5                  |           |            |      |
| 20/0062 | referentie mest    |        |             |                      | 1,55                   |                      | 75,0                  |           |            |      |

**Tabel B1.2** Mestanalyses mestkoeling bedrijf B2

|        |               |          |        | totaal-<br>N | ammonium-<br>N | totaal-<br>P | droge<br>stof | K        | as       | pH  |
|--------|---------------|----------|--------|--------------|----------------|--------------|---------------|----------|----------|-----|
|        |               |          |        | g/kg         | g/kg           | g/kg         | g/kg          | g/k<br>g | g/k<br>g |     |
| 21/159 |               | Holwierd | 23/6/2 |              |                |              |               |          |          |     |
| 3      | gekoelde mest | e        | 1      | 3,17         | 1,52           | 0,48         | 72,1          | 3,7<br>0 | 18,<br>2 | 7,4 |
| 21/159 | referentie    |          |        |              |                |              |               | 4,1      | 22,      |     |
| 4      | mest          |          |        | 4,13         | 1,91           | 0,71         | 104,1         | 1        | 5        | 7,1 |
| 21/046 |               | Holwierd | 17/3/2 |              |                |              |               |          |          |     |
| 3      | gekoelde mest | e        | 1      | 3,59         | 1,65           |              | 74,1          |          | -        | 7,4 |
| 21/046 | referentie    |          |        |              |                |              |               |          |          |     |
| 4      | mest          |          |        | 4,65         | 1,48           |              | 127,6         |          | -        | 6,8 |
| 21/010 |               | Holwierd | 27/1/2 |              |                |              |               |          | 20,      |     |
| 5      | gekoelde mest | e        | 1      | 3,77         | 1,74           |              | 78,5          |          | 6        | 7,3 |
| 21/010 | referentie    |          |        |              |                |              |               |          | 22,      |     |
| 6      | mest          |          |        | 4,28         | 2,00           |              | 93,0          |          | 1        | 7,2 |
| 20/140 |               | Holwierd | 4/11/2 |              |                |              |               |          |          |     |
| 7      | gekoelde mest | e        | 0      | 3,38         | 1,68           |              | 69,0          |          |          | 7,4 |
| 20/140 | referentie    |          |        |              |                |              |               |          |          |     |
| 6      | mest          |          |        | 4,24         | 1,17           |              | 116,6         |          |          | 7,0 |
| 20/110 |               | Holwierd | 17/9/2 |              |                |              |               |          |          |     |
| 8      | gekoelde mest | e        | 0      | 3,20         | 1,41           |              | 77,0          |          |          | 7,5 |
| 20/110 | referentie    |          |        |              |                |              |               |          |          |     |
| 7      | mest          |          |        | 4,30         | 1,94           |              | 96,7          |          |          | 7,4 |
| 20/090 |               | Holwierd |        |              |                |              |               |          |          |     |
| 4      | gekoelde mest | e        | 4/8/20 | 3,30         | 1,53           |              | 75,8          |          |          | 7,2 |
| 20/090 | referentie    |          |        |              |                |              |               |          |          |     |
| 5      | mest          |          |        | 4,15         | 1,67           |              | 110,8         |          |          | 6,9 |
| 20/062 | gekoelde mest | Holwierd | 20/5/2 |              |                |              |               | 3,7      | 16,      | 6,9 |
| 9      |               | e        | 0      | 3,01         | 1,46           | 0,44         | 67,4          | 7        | 6        | 4   |
| 20/062 | referentie    |          |        |              |                |              |               | 4,2      | 21,      | 7,0 |
| 8      | mest          |          |        | 3,94         | 1,90           | 0,62         | 86,9          | 5        | 4        | 9   |
| 20/031 | gekoelde mest | Holwierd | 11/3/2 |              |                |              |               | 3,8      | 17,      |     |
| 8      |               | e        | 0      | 3,29         | 1,57           | 0,47         | 73,3          | 5        | 7        | 7,2 |
| 20/031 | referentie    |          |        |              |                |              |               | 4,7      | 20,      |     |
| 9      | mest          |          |        | 3,75         | 1,85           | 0,54         | 80,7          | 2        | 4        | 7,2 |
| 20/018 |               | Holwierd | 12/2/2 |              |                |              |               |          |          |     |
| 4      | gekoelde mest | e        | 0      |              | 1,46           |              |               |          |          | 7,2 |
| 20/018 | referentie    |          |        |              |                |              |               |          |          |     |
| 5      | mest          |          |        |              | 1,72           |              |               |          |          | 7,3 |
| 20/006 |               | Holwierd |        |              |                |              |               |          |          |     |
| 3      | gekoelde mest | e        | 8/1/20 | 2,87         | 1,41           |              | 57,5          |          |          |     |
| 20/001 | referentie    |          |        |              |                |              |               |          |          |     |
| 5      | mest          |          |        |              | 1,68           |              | 69,8          |          |          |     |

**Tabel B1.3** Mestanalyses mest mixen met lucht

|        |            |               |             | totaal-<br>N | ammonium-<br>-N | totaal-<br>P | droge<br>stof | K        | as       | pH |
|--------|------------|---------------|-------------|--------------|-----------------|--------------|---------------|----------|----------|----|
|        |            |               |             | g/kg         | g/kg            | g/kg         | g/kg          | g/k<br>g | g/k<br>g |    |
| 21/183 | gemixte    |               | 14/7/2      |              |                 |              |               | 4,2      | 18,      | 7, |
| 4      | mest       | Ouderkerk a/d | 1           | 3,74         | 1,84            | 0,53         | 74,0          | 5        | 0        | 3  |
| 21/183 | referentie | Amstel        |             |              |                 |              |               | 4,4      | 18,      | 7, |
| 3      | mest       |               |             | 3,38         | 1,74            | 0,51         | 73,1          | 5        | 5        | 4  |
| 21/136 | gemixte    |               |             |              |                 |              |               | 4,7      | 20,      | 7, |
| 0      | mest       | Ouderkerk a/d | 2/6/21      | 4,16         | 2,21            | 0,58         | 77,3          | 5        | 2        | 0  |
| 21/135 | referentie | Amstel        |             |              |                 |              |               | 5,2      | 24,      | 7, |
| 9      | mest       |               |             | 4,81         | 2,39            | 0,75         | 96,7          | 5        | 4        | 1  |
| 21/080 | gemixte    |               |             |              |                 |              |               | 4,7      | 19,      | 7, |
| 7      | mest       | Ouderkerk a/d | 7/4/21      | 4,22         | 1,91            | 0,67         | 83,9          | 6        | 7        | 2  |
| 21/080 | referentie | Amstel        |             |              |                 |              |               | 5,0      | 21,      | 7, |
| 8      | mest       |               |             | 4,21         | 1,97            | 0,65         | 87,6          | 1        | 5        | 1  |
| 21/017 | gemixte    |               |             |              |                 |              |               | 4,7      | 20,      | 7, |
| 0      | mest       | Ouderkerk a/d | 3/2/21      | 4,26         | 1,92            | 0,67         | 87,2          | 3        | 4        | 2  |
| 21/016 | referentie | Amstel        |             |              |                 |              |               | 4,6      | 28,      | 7, |
| 9      | mest       |               |             | 4,29         | 1,89            | 0,74         | 95,8          | 6        | 6        | 3  |
|        |            |               | 12/9/2<br>0 |              |                 |              |               |          |          |    |

**Tabel B1.4** Mestanalyses primaire scheiding + vaste mest

|        |                      |           |          | totaal-<br>-N | ammonium-<br>N | totaal-<br>P | droge<br>stof | K        | as       | pH |
|--------|----------------------|-----------|----------|---------------|----------------|--------------|---------------|----------|----------|----|
|        |                      |           |          | g/kg          | g/kg           | g/kg         | g/kg          | g/k<br>g | g/k<br>g |    |
| 21/234 |                      | Kaatsheuv |          |               |                |              |               | 3,4      | 67,      | 8, |
| 0      | vaste mest           | el        | 22/9/21  | 4,06          | 0,56           | 1,19         | 187,9         | 7        | 0        | 3  |
| 21/233 |                      |           |          |               |                |              |               | 0,5      | 34,      | 6, |
| 9      | dunne fractie        |           |          | 1,94          | 0,19           | 0,24         | 100,1         | 4        | 6        | 9  |
| 21/198 |                      | Kaatsheuv |          |               |                |              |               | 3,6      | 41,      | 6, |
| 8      | vaste mest           | el        | 28/7/21  | 2,64          | 0,42           | 0,91         | 143,4         | 3        | 3        | 8  |
| 21/198 |                      |           |          |               |                |              |               | 0,6      | 35,      | 7, |
| 9      | dunne fractie        |           |          | 1,74          | 0,27           | 0,21         | 96,0          | 7        | 2        | 6  |
| 21/117 |                      | Kaatsheuv |          |               |                |              |               | 4,0      | 31,      | 7, |
| 6      | vaste mest           | el        | 19/5/21  | 3,57          | 0,52           | 0,72         | 159,6         | 0        | 5        | 6  |
| 21/117 |                      |           |          |               |                |              |               | 1,5      | 51,      | 7, |
| 7      | dunne fractie        |           |          | 2,49          | 0,58           | 0,44         | 119,6         | 7        | 1        | 3  |
| 21/062 |                      | Kaatsheuv |          |               |                |              |               | 4,6      | 28,      | 8, |
| 9      | vaste mest           | el        | 24/3/21  | 3,67          | 0,46           | 0,81         | 158,3         | 7        | 0        | 0  |
| 21/062 |                      |           |          |               |                |              |               | 6,1      | 49,      | 7, |
| 7      | dunne fractie stal   |           |          | 3,52          | 1,56           | 0,73         | 111,3         | 8        | 2        | 9  |
| 21/062 |                      |           |          |               |                |              |               | 3,7      | 11,      | 7, |
| 8      | dunne fractie kelder |           |          | 1,16          | 0,95           | 0,03         | 15,7          | 0        | 3        | 8  |
| 21/009 |                      | Kaatsheuv |          |               |                |              |               | 4,6      | 28,      | 8, |
| 8      | vaste mest nieuw     | el        | 20/1/21  | 3,30          | 0,29           | 0,79         | 182,4         | 7        | 3        | 0  |
| 21/009 |                      |           |          |               |                |              |               | 3,5      | 42,      | 7, |
| 7      | vaste mest oud       |           |          | 3,61          | 0,51           | 0,80         | 167,4         | 1        | 5        | 8  |
| 21/009 |                      |           |          |               |                |              |               | 4,8      | 29,      | 7, |
| 9      | dunne fractie        |           |          | 3,54          | 1,40           | 0,73         | 97,0          | 6        | 8        | 7  |
|        |                      |           | 25/11/20 |               |                |              |               |          |          |    |



## Bijlage 2 - Overzicht van adoptiefactoren per maatregel/techniek (expertconsultatie)

| Maatregel/techniek                      | Adoptie remmend                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Adoptie stimulerend                                                                                                                                                              | Opmerkingen                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Gasdichte mestopslag                 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Risico op ontploffingsgevaar (of perceptie daarvan)</li> <li>2. Investering</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. In potentie lagere ammoniakemissie</li> <li>2. Past binnen bestaande vergunning</li> <li>3. Biedt ontwikkelruimte</li> </ol>           | <p>Vragen rond de mogelijkheid om goed gasdicht af te sluiten.</p> <p>Ammoniak voordeel alleen in combinatie met luchtwasser en ontwikkelruimte bij erkenning systeem (Rav).</p> <p>Nageschakelde fakkel (CH<sub>4</sub> oxidatie) ongunstig voor beeld natuurlijke productie en inpasbaarheid landschap.</p> |
| 2. Mest frequent uit kelder verwijderen | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Extra mestopslag en mesthandling</li> <li>2. Voegt arbeid en complexiteit toe</li> <li>3. Goed te combineren met weidegang</li> <li>4. Investering</li> <li>5. Operationele kosten, geen baten</li> <li>6. Geen ontwikkelruimte</li> <li>7. In combinatie met aanvullende maatregelen (monovergister, fakkel) ongunstig voor inpasbaarheid landschap</li> </ol>                                                                                           | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Goed toepasbaar in bestaande stallen</li> <li>2. Inpasbaar in oude stallen</li> <li>3. Bedrijfsstijl nauwelijks van invloed</li> </ol> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 3. Dagontmesting vanaf dichte vloer     | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Moeilijk toepasbaar in bestaande stallen</li> <li>2. Past niet goed bij bedrijven met mestafvoer.</li> <li>3. Voegt arbeid en complexiteit toe.</li> <li>4. Past niet binnen bestaande vergunning.</li> <li>5. Vraagt extra mestopslag en handling van mest</li> <li>7. Investering</li> <li>8. Waardevermindering mogelijk door minder benutten bestaande opslag</li> <li>9. Ongunstig voor inpasbaarheid landschap (aanvullende maatregelen)</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. In potentie lagere ammoniakemissie</li> <li>2. Ontwikkelruimte vanwege verwacht lagere ammoniakemissie</li> </ol>                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 4. Dagontmesting en mestscheiden        | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Moeilijk toepasbaar in bestaande situatie</li> <li>2. Moeilijk toepasbaar in oude stallen</li> <li>3. Risico rond gasdichte opslag???</li> <li>4. Voegt arbeid en complexiteit toe</li> <li>5. Past niet binnen bestaande vergunning</li> <li>6. Vraagt extra mestopslag en handling van mest</li> <li>7. Investering</li> </ol>                                                                                                                          | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. In potentie lagere ammoniakemissie</li> <li>2. Gunstig voor mestafzet vanwege de scheidingsstap</li> <li>3. Ontwikkelruimte</li> </ol> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

|                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                 | 8. Waardevermindering mogelijk door minder benutten bestaande opslag                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                         |
| 5. Dagontmesting en mest scheiden (zonder gasdichte mestopslag) | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Moeilijk toepasbaar in bestaande situatie</li> <li>2. Moeilijk toepasbaar in oude stallen</li> <li>3. Risico rond gasdichte opslag</li> <li>4. Past niet binnen bestaande vergunning</li> <li>5. Vraagt extra mestopslag en handling van mest</li> <li>6. Investering</li> <li>7. Waardevermindering mogelijk door minder benutten bestaande opslag</li> </ol>                                                   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. In potentie lagere ammoniakemissie</li> <li>2. Gunstig voor mestafzet</li> <li>3. Ontwikkelruimte</li> </ol>                                                                                                                    |                                                                                                                                                         |
| 6. Composteren (secundaire mestscheiding)                       | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Leeftijd van stal, hebben meestal geen dichte vloer</li> <li>2. Extra mestopslag/handling van mest nodig</li> <li>3. Voegt arbeid en complexiteit toe</li> <li>4. Remmend voor weidegang</li> <li>5. Investering</li> <li>6. Waardevermindering door onderbenutting bestaande opslag</li> <li>7. Inpasbaarheid landschap door extra gebouw</li> </ol>                                                            | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mestafzet in de uitgangssituatie</li> <li>2. In potentie lagere ammoniakemissie</li> <li>3. Verwaarding mogelijk via mest</li> </ol>                                                                                            | Ammoniak voordeel alleen in combinatie met luchtwasser.                                                                                                 |
| 7. Composteren (primaire mestscheiding)                         | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bedrijfsstijl van invloed, past beter bij composterings- of natuurgerichte boeren en bij mestafzet</li> <li>2. Extra mestopslag/handling van mest nodig</li> <li>3. Voegt arbeid en complexiteit toe</li> <li>4. Investering</li> <li>5. Waardevermindering door onderbenutting bestaande opslag</li> </ol>                                                                                                      | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mestafzet in de uitgangssituatie</li> <li>2. In potentie lagere ammoniakemissie</li> <li>3. Verwaarding mogelijk via mest</li> <li>4. Positief effect natuurlijkheid productie</li> <li>5. Positief effect landschap</li> </ol> | Ammoniak voordeel alleen in combinatie met luchtwasser en ontwikkelruimte bij erkenning systeem<br><br>Effect landschap via verbetering biodiversiteit. |
| 8. Koelen                                                       | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Risico's in verband met extra installaties</li> <li>2. Extra arbeid</li> <li>3. Investering</li> <li>4. Operationele kosten (Elektriciteitsgebruik)</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Past relatief goed in oude stal</li> <li>2. In potentie lagere ammoniakemissie</li> <li>3. Past binnen bestaande vergunning</li> <li>4. Geen extra opslag of mesthandling nodig</li> </ol>                                      |                                                                                                                                                         |
| 9. Vergisten                                                    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bedrijfsstijl grote invloed, specifieke technologie die niet bij elke veehouder past</li> <li>2. Past niet binnen bestaande vergunning</li> <li>3. Voegt arbeid en complexiteit toe</li> <li>4. Investering</li> <li>5. Mogelijk waardevermindering door onderbenutting bestaande opslag</li> <li>6. Ongunstig voor beeld natuurlijkheid productie</li> <li>7. Ongunstig voor inpasbaarheid landschap</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mestafzet in de uitgangssituatie</li> <li>2. In potentie lagere ammoniakemissie</li> <li>3. Gunstig voor mestafzet (hygiënisatie)</li> <li>4. Verwaarding via biogas</li> </ol>                                                 |                                                                                                                                                         |

|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                            |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10. Aanzuren           | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Toepasbaarheid in bestaande situatie</li> <li>2. Bedrijfsstijl grote invloed, specifieke technologie die niet bij elke veehouder past</li> <li>3. Risico in werken met zuur</li> <li>4. Extra mestopslag en handling nodig</li> <li>5. Voegt arbeid en complexiteit toe</li> <li>6. Investering</li> <li>7. Hoge operationele kosten zonder baten</li> <li>8. Ongunstig voor beeld natuurlijkheid productie</li> <li>9. Ongunstig voor inpasbaarheid landschap</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Biedt mogelijk ontwikkelruimte</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <p>Mogelijk aanpassing keldervloer en muren nodig</p> <p>Ontwikkelruimte op basis van reductie ammoniak, alleen bij erkenning systeem.</p> |
| 11. Mixen of beluchten | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mogelijk extra arbeid</li> <li>2. Biedt geen ontwikkelruimte</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Goed inpasbaar bestaande stallen</li> <li>2. Inpasbaar in oude stallen</li> <li>3. Bedrijfsstijl niet van invloed</li> <li>4. Past binnen bestaande vergunning</li> <li>5. Geen extra opslag of mesthandling</li> <li>6. Investering relatief laag</li> <li>7. Geen waardevermindering door onderbenutting bestaande opslag</li> </ol> | <p>Extra arbeid hangt af van invulling van het systeem (elektrische mixers)</p>                                                            |
| 12. Methaanoxidatie    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Moeilijk toepasbaar in bestaande situatie</li> <li>2. Moeilijk toepasbaar in oude stallen</li> <li>3. Past niet binnen bestaande vergunning</li> <li>4. Voegt arbeid en complexiteit toe</li> <li>5. Investering</li> <li>6. Waardevermindering mogelijk door minder benutten bestaande opslag</li> <li>7. Geen ontwikkelruimte</li> <li>8. Ongunstig voor beeld natuurlijkheid productie</li> <li>9. Ongunstig voor inpasbaarheid landschap</li> </ol>                   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Lage operationele kosten</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <p>Veel hangt af van de exacte invulling van het systeem.</p>                                                                              |

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



---

Wageningen Livestock Research  
Postbus 338  
6700 AH Wageningen  
T 0317 48 39 53  
E [info.livestockresearch@wur.nl](mailto:info.livestockresearch@wur.nl)  
[www.wur.nl/livestock-research](http://www.wur.nl/livestock-research)

---

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

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

