



---

# Mest koelen tegen het opwarmen van de aarde

'Mest koelen 1.0 + 2.0' en 'extern mest koelen' om de methaanemissie (en ammoniakemissie) in de melkveehouderij te reduceren

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

OPENBAAR  
RAPPORT 1486



**WAGENINGEN**  
UNIVERSITY & RESEARCH

---



# Mest koelen tegen het opwarmen van de aarde

'Mest koelen 1.0 + 2.0' en 'extern mest koelen' om de methaanemissie (en ammoniakemissie) in de melkveehouderij te reduceren

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

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 Emissiereductie methaan veehouderij (projectnummer BO-53-003-058 en BO-43-105-021).

Wageningen Livestock Research  
Wageningen, mei 2024

---

Rapport 1486

---

Puente-Rodríguez, D., Vonk, J., Bos, A.P., Maasdam, E. & Aarnink, A.J.A. 2024. *Mest koelen tegen het opwarmen van de aarde; 'Mest koelen 1.0 + 2.0' en 'extern mest koelen' om de methaanemissie (en ammoniakemissie) in de melkveehouderij te reduceren*. Wageningen Livestock Research, Rapport 1486.

**Samenvatting NL** Temperatuur is een belangrijke factor die de methaanemissie uit mest beïnvloedt. Met de klimaatopgaven op de achtergrond werden in het kader van het programma Klimaatenvelop - Integraal Aanpakken van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit in dit onderzoek twee mestkoelingssystemen ontworpen, getest en bemeten onder praktijkomstandigheden op melkveebedrijven. Het eerste is een systeem voorzien van koelleidingen die drijven op de in kelders opgeslagen mest, dit werd ondersteund met een eerder geïnstalleerd mestkoelingssysteem. Dit leverde gedurende circa één jaar een gemiddelde methaanemissiereductie (uit de mest) van 69%. Het tweede is een systeem dat mest buiten de kelder koelt en de gekoelde mest terugbrengt in de mestkelder. Bij dit laatste experiment zijn in dit onderzoek geen emissiemetingen uitgevoerd, maar werd de praktische toepasbaarheid van het systeem om mest te koelen onderzocht.

**Summary UK** Temperature is a key factor influencing methane emissions from manure. Challenged by the climate crisis, and in the context of the Climate Envelope – Integral Approach program of the Dutch Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality, within this research two manure cooling systems were designed, tested and measured in the real-life conditions on Dutch dairy farms. The first one is a system consisting of cooling pipes that float on the manure that is stored in cellars. This system was supported with a previously installed manure cooling system. This combination resulted in an average methane emission reduction (from manure) of 69%. The second system cools manure outside the cellar and returns the cooled manure to the manure cellar. No emission measurements were carried out in this last experiment, but the capacity of the system to cool manure was investigated.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/658567> 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, 2024

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

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

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

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

Openbaar Wageningen Livestock Research Rapport 1486

---

# Inhoud

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inleiding</b>   | <b>5</b>  |
| 1.1      | Temperatuur en methaanemissie  | 6         |
| 1.1.1    | Werkingsmechanisme en potentie - CH <sub>4</sub>                                   | 6         |
| 1.2      | Temperatuur en ammoniakemissie   | 9         |
| 1.2.1    | Werkingsmechanisme en potentie - NH <sub>3</sub>                                   | 9         |
| 1.2.2    | Effect van mest mixen?   | 10        |
| 1.3      | Experimenten   | 11        |
| <b>2</b> | <b>Het koelen van mest door middel van koelleidingen in mestkelders; 2.0 + 1.0</b> | <b>12</b> |
| 2.1      | Inleiding  | 12        |
| 2.2      | Melkveebedrijf-, testopstelling- en systeembeschrijving                            | 13        |
| 2.2.1    | Mest koelen 1.0 aan tijdens het experiment met 2.0                                 | 16        |
| 2.3      | Methodologie – Broeikasgas- en ammoniakemissiemetingen                             | 16        |
| 2.3.1    | Analyse mestmonsters   | 19        |
| 2.4      | Resultaten   | 19        |
| 2.4.1    | Temperatuur  | 19        |
| 2.4.2    | Emissies   | 22        |
| 2.4.3    | Mestmonsters   | 23        |
| 2.5      | Belangrijke aspecten voor inpasbaarheid in de melkveehouderij                      | 24        |
| 2.5.1    | Economische kosten en baten  | 24        |
| 2.5.2    | Implementatie in de melkveestal - praktische aspecten                              | 27        |
| 2.5.3    | Institutionele aspecten  | 27        |
| 2.6      | Conclusies en reflectie  | 28        |
| <b>3</b> | <b>Extern mest koelen</b>  | <b>29</b> |
| 3.1      | Inleiding  | 29        |
| 3.1.1    | Ontwerptraject   | 29        |
| 3.2      | Melkveebedrijf, testopstelling en systeembeschrijving                              | 30        |
| 3.3      | Temperatuurmetingen  | 32        |
| 3.4      | Resultaten   | 33        |
| 3.4.1    | Continue temperatuurmetingen   | 33        |
| 3.4.2    | Handmatige temperatuurprofielen  | 35        |
| 3.4.3    | Andere resultaten en inzichten   | 36        |
| 3.5      | Conclusies en reflectie  | 37        |
| <b>4</b> | <b>Conclusies en discussie</b>   | <b>38</b> |
|          | <b>Dankwoord</b>   | <b>41</b> |
|          | <b>Literatuur</b>  | <b>42</b> |
|          | <b>Bijlage – boxplot NH<sub>3</sub> en N<sub>2</sub>O</b>                          | <b>45</b> |

---

---

# 1 Inleiding

Klimaatverandering is een van de grootste uitdagingen van onze tijd. In het Klimaatakkoord van Parijs (2015) hebben bijna tweehonderd landen afgesproken om een globale temperatuurstijgingsplafond van maximaal 2 °C te hanteren, en het doel is te streven naar maximaal 1,5 °C<sup>1</sup>. Nederland heeft dit Klimaatakkoord in 2016 geratificeerd<sup>2</sup>. Hiervoor heeft de Nederlandse overheid zich als doel gesteld om in 2030 een reductie van 49% van de nationale broeikasgas (BKG) emissies te realiseren ten opzichte van 1990. Dit is vastgelegd in de Klimaatwet en hierin is ook opgenomen dat in 2050 95% reductie gerealiseerd moet zijn. 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 bepaald dat Nederland in 2020 25% minder BKG moet uitstoten ten opzichte van 1990. Dit is door de Hoge Raad in 2019 bekrachtigd.

Ook de veehouderij moet haar bijdrage leveren. De methaanemissies van de landbouw daalden tussen 1990 en 2005 met 23,2% om vervolgens weer licht te stijgen door een toename in productiviteit. Na 2016 zijn de enterische methaanemissies (pens- en darmfermentatie) en die uit de mest weer gedaald als gevolg van een afname in het aantal melkkoeien en varkens. Overall daalden de emissies van methaan uit de landbouw daardoor met 18,8% tussen 1990 en 2020 (Ruysenaars et al., 2022).

De land- en tuinbouw is verantwoordelijk voor de emissie van 10 tot 15% van het totaal aan broeikasgassen, exclusief de emissies door energieverbruik en landgebruik(-sveranderingen). De doelstelling uit de Klimaatwet van 2018 waarin het nationaal klimaat- en energieakkoord is verankerd, is om tot 2030 binnen de landbouw en aanverwante sectoren 3,5 Mton CO<sub>2</sub>-eq te reduceren, waarvan 1,5 Mton reductie door slimmer landgebruik en 1 Mton reductie door de glastuinbouw. In het Klimaatakkoord (2019, blz. 119<sup>3</sup>) is voor 2030 verder een reductieopgave van 1,2 - 2,7 Mton CO<sub>2</sub>-eq afgesproken voor de gehele veehouderij. Daarnaast was in het regeerakkoord van het kabinet-Rutte IV (2021<sup>4</sup>) opgenomen dat dit tenminste 1 Mton CO<sub>2</sub>-eq emissiereductie van methaan betreft.

Dit onderzoek beoogt bij te dragen aan het laatstgenoemde doel. Daarbij ligt de focus op de reductie van methaanemissie uit mest. Jaarlijks wordt door de veehouderij 13 Mton CO<sub>2</sub>-eq aan methaan uitgestoten - 8 Mton CO<sub>2</sub>-eq enterisch methaan en 5 Mton CO<sub>2</sub>-eq uit mestopslagen. Bijna 80% van de methaanemissie uit de Nederlandse veehouderij is afkomstig van rundvee. Bij melkvee wordt ingeschat dat 20-25 % van de totale methaanemissie uit de mest komt.

In deze studie wordt integraal naar emissies gekeken, dus ook naar ammoniak en lachgas. In de Nederlandse veehouderij, en de maatschappij in brede zin is op dit moment de stikstofopgave een acute zorg, zowel vanwege biodiversiteitsdoelstellingen (Vogel- en Habitatrichtlijn) als vanwege de waterkwaliteit (Kaderrichtlijn Water). De Europese NEC-richtlijn uit 2016 verplicht Nederland om in 2030 21 procent minder ammoniak ten opzichte van 2005 uit te stoten (PBL, 2023). In Nederland moet op grond van de Wet stikstofreductie en natuurverbetering in 2030 minimaal 50% van het areaal van de stikstofgevoelige natuur in beschermde Natura 2000-gebieden de kritische depositiewaarde niet overschreden worden en in 2035 minimaal 74%. Wat dit betekent voor welke bedrijven staat op het moment van schrijven nog ter discussie, en is onderwerp van de provinciale gebiedsplannen in het kader van het Nationaal Programma Landelijk Gebied (NPLG).

Het doel van deze studie was om via ontwerp, ontwikkeling en (emissie)metingen, de technische kansen om de methaanemissie uit mest te reduceren door het koelen van drijfmest in en uit bestaande mestkelders van melkveestallen te onderzoeken. Daarbij werden tevens andere factoren geïnventariseerd die belangrijk zijn voor een brede implementatie en adoptie van deze maatregel in de Nederlandse melkveehouderij.

---

<sup>1</sup> Volgens de klimaatdienst van de EU is de opwarming van de aarde voor het eerst in een heel jaar hoger dan 1,5 graden Celsius, [Warmest January on record, 12-month average over 1.5°C above preindustrial | Copernicus](#) (geraadpleegd februari 2024).

<sup>2</sup> De doelstelling van de Europese Unie is om in 2030 de BKG-emissies ten opzichte van 1990 met 40% te reduceren.

<sup>3</sup> [Klimaatakkoord | Publicatie | Klimaatakkoord](#) (geraadpleegd december 2023).

<sup>4</sup> [Restemissieopgave broeikasgassen landbouw en landgebruik \(pbl.nl\)](#) (geraadpleegd december 2023).

De uiteindelijke doelgroep is de grote groep melkveehouders met een traditionele rundveestal met langdurige mestopslag onder de stal. Dit onderzoek bouwt voor op eerdere experimenten die zijn uitgevoerd rondom mest koelen (zie hoofdstuk 2 in Puente-Rodríguez et al., 2023).

Dit onderzoek werd gefinancierd door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) in het kader van het beleidsondersteunend onderzoeksprogramma Klimaatvelop 'Integraal Aanpakken'<sup>5</sup> en is uitgevoerd door Wageningen Livestock Research in samenwerking met de bedrijven Geothermica en L'orèl Consultancy.

De volgende twee paragrafen vatten de basis werkingsmechanismen en literatuur rondom het effect van temperatuur op de methaan- en ammoniakemissies samen. Hoofdstuk 2 presenteert de resultaten en inzichten uit onderzoek naar het koelen van mest in de mest(kelder). Hoofdstuk 3 presenteert het experiment met een systeem dat mest buiten de mestkelder (en de stal) koelt. In het laatste hoofdstuk worden de resultaten en bevindingen bediscussieerd, en de conclusies samengevat.

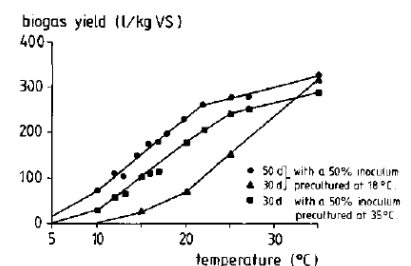
## 1.1 Temperatuur en methaanemissie

Methaan (CH<sub>4</sub>) wordt in de mest gevormd (ook wel methanogenese genoemd) door micro-organismen die onder anaerobe omstandigheden organische stof afbreken. De mestkelders in de melkveehouderij bieden goede omstandigheden voor methaanvorming. De mest blijft tot 7 maanden in de kelders die tussen de 1,5 en 2 meter diep zijn. Deze anaerobe condities en de grote hoeveelheid beschikbare organische stof maken van mestkelders bioreactoren - ongecontroleerde mestvergisters. Tijdens de lente-zomer uitrijperiode worden de mestkelders geleegd, maar niet volledig. De laag oude mest die achterblijft ('inoculum') is rijk aan methanogene micro-organismen, een startpopulatie om de verse mest mee te inoculeren. Dit zorgt voor een snelle toename van de methaanemissie uit de verse mest die hieraan toegevoegd wordt (Massé et al., 2016; Sokolov et al., 2019; Sokolov et al., 2020).

Dierlijke mest bevat plantaardig en microbiel materiaal in verschillende stadia van afbraak, niet geabsorbeerde verteringsproducten (zoals aminozuren en vetzuren) en mineralen. Rundvee-drijfmest heeft gemiddeld <10% droge stof (DS) en is verpompbaar (Remmelink et al., 2020/21). Ongeveer 75% van de DS bestaat uit (gemakkelijk) afbreekbare organische stoffen (Dalby et al., 2021; Remmelink et al., 2020/21; Van Boxmeer et al., 2023). Dit wordt beïnvloed door voer en mestmanagement. De samenstelling van mest kan daarmee per bedrijf sterk variëren, maar ook veranderen met de leeftijd van de dieren, omgevingsfactoren, etc.

### 1.1.1 Werkingsmechanisme en potentie - CH<sub>4</sub>

In 1991 bepaalde Grietje Zeeman in haar PhD thesis (Zeeman, 1991), het verband tussen mesttemperatuur en CH<sub>4</sub>-productie in de Nederlandse context. Ze modelleerde ook de relatie tussen de hoeveelheid verse mest, de hoeveelheid inoculum en de temperatuur (Zeeman, 1994). Volgens dit onderzoek zou de methaanuitstoot geremd kunnen worden bij temperaturen onder de 10 °C, met een inoculum van 50% - zie Figuur 1.



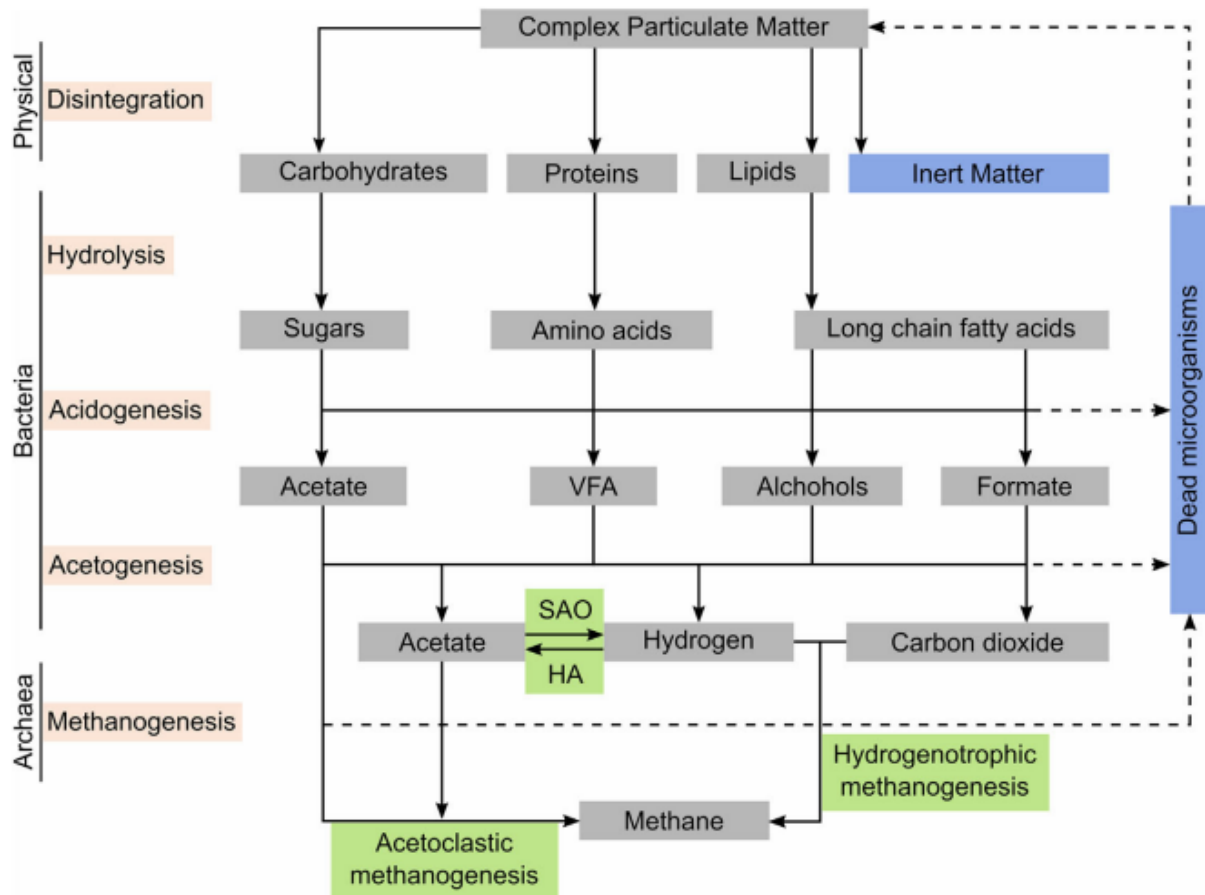
**Figuur 1** Effect van temperatuur op biogasproductie (Zeeman, 1991).

Kennis over de relatie tussen temperatuur en methaanvorming is vooral afkomstig uit het vergistingsdomein. In die context wordt juist gefocust op het maximaliseren van de methaanproductie uit mest om biogas te produceren (Amon et al., 2006a; Amon et al., 2006b; Chadwick et al., 2011; De Vries et al., 2012; Rodhe et al., 2015; McVoitte & Clark, 2019; Groenestein et al., 2020; Jiang et al., 2021).

<sup>5</sup> <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2018/10/10/klimaatvelop-225-miljoen-voor-circulaire-economie>.



Anaerobe micro-organismen produceren CH<sub>4</sub> en CO<sub>2</sub> via een opeenvolging van transformaties in vier of vijf stappen: fysieke desintegratie en hydrolyse van OS, acidogenese, acetogenese en methanogenese (Dalby et al., 2021; Groenestein et al., 2020), zie Figuur 2. Factoren zoals de snelheid van substraattransformatie, de hoeveelheid actieve microbiële biomassa, etc. kunnen een van deze hoofdstappen en/of het gehele proces beïnvloeden.

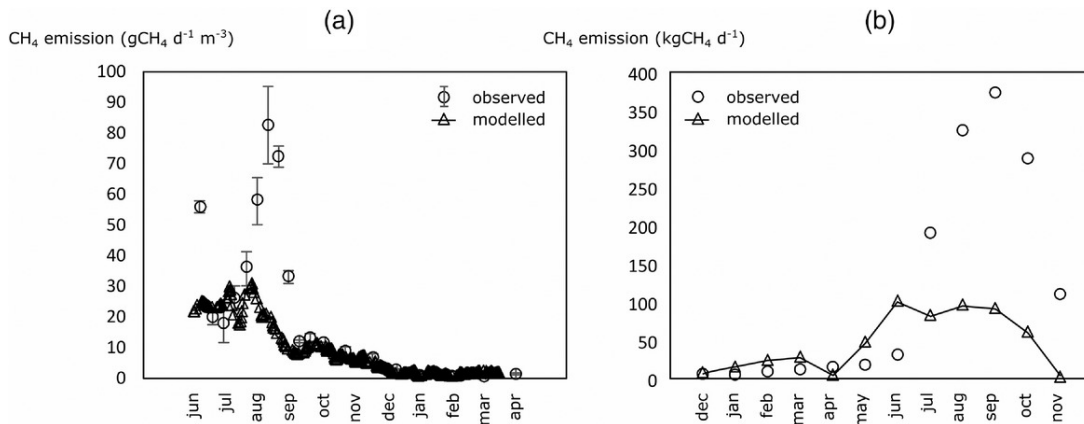


**Figuur 2** Transformaties uitgevoerd door bacteriën en methanogene archaea micro-organismen in anaerobe vergisters en andere anaerobe omgevingen (Dalby et al., 2021). HA: homoacetogenese. SAO: syntrophische acetate oxidatie.

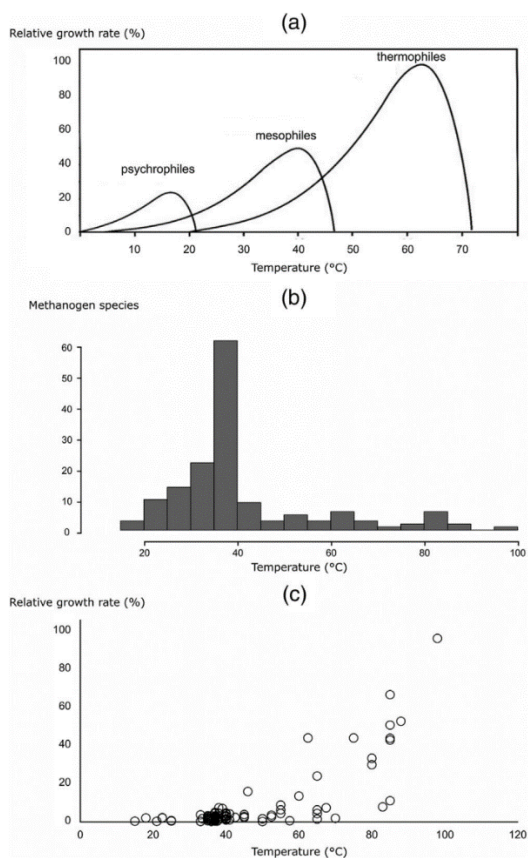
Dalby et al. (2021, en referenties erin) melden dat de meeste methanogenen in drijfmest afkomstig zijn uit de darm van het dier. In pens-vloeistoffen worden de hydrogenotrofe methanogenen zoals *Methanobrevibacter*, *Methanobacterium* en *Methanomicrobium* als dominant beschouwd, maar recente studies wijzen ook op het belang van waterstof-afhankelijke methylotrofe methanogenen die ook tot de *Methanomassiliicoccales*-orde behoren. De samenstelling van de methanogene gemeenschap in mestverwerkingssystemen (zoals vergisters) is echter vaak enorm verschillend van darmgemeenschappen, omdat factoren zoals temperatuur, totaal OS, ammoniakgehalte en pH aanzienlijk verschillen tussen de twee omgevingen (Habtewold et al., 2018; Dalby et al., 2021). Bij oude mest worden vaak genera zoals *Methanoculleus*, *Methanocorpusculum* en *Methanosarcina* gezien als dominant (Dalby et al., 2021 en referenties erin).

Populaties van bacteriën en archaea reageren op de fysisch-chemische condities (Habtewold et al., 2018). Daarbij vindt een constant proces van adaptatie plaats. Op korte termijn kunnen micro-organismen reageren op een omgevingsverandering (bijvoorbeeld temperatuur of pH). Dit gebeurt o.a. via genexpressie voor het synthetiseren van cellulaire componenten die nodig zijn voor het groeien onder de nieuwe omstandigheden (Dalby et al., 2021).

Methaanproductie is afhankelijk van temperatuur. De IPCC-richtlijnen stellen dat er een negenvoudige toename van de methaanproductiesnelheid in mest plaatsvindt bij een toename in de temperatuur van 15 naar 35 °C. Echter in hun reviewstudie, laten Dalby en collega's (2021) zien dat modellen die gebruikt worden voor de temperatuurrepons van methaanemissie een onvolledige inschatting maken, zie Figuur 3 en zie ook Baldé et al. (2016). Deze figuur laat tevens zien dat er weinig methaan ontstaat bij lage temperaturen.



**Figuur 3** (a) CH<sub>4</sub>-emissies waargenomen tijdens opslag van runderdrijfmest op pilotschaal van juni 2014 tot april 2015 in Denemarken (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). Uit Dalby et al., 2021.

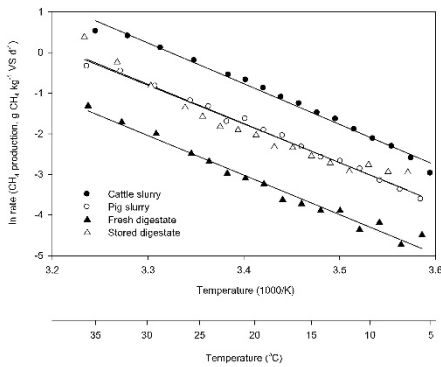


**Figuur 4** (a) Methanogene soorten in relatie tot hun optimale temperatuur (Dalby et al., 2021). (b) verspreiding/aantallen soorten over temperatuurbereik en (c) intrinsieke groeisnelheid uit een methanogene database genormaliseerd naar het waargenomen maximum (Jablonski et al., 2015).

Er zijn drie soorten microbiële groepen met verschillende temperatuuroptima: psychrofiel (5-20 °C), mesofiel (25-40 °C) en thermofiel (boven 45 °C), zie Figuur 4. Eventueel kan ook nog over hyperthermofiele soorten gesproken worden (Jablonski et al., 2015), maar deze spelen bij mestopslag en -vergisting verder geen rol van betekenis. Als de temperatuur verandert, dan verandert het 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., 2021).

Dankzij onderzoek en praktijkervaringen rondom anaerobe vergisting is er veel bekend over de mesofiele en thermofiele condities. Er is echter weinig bekend over de psychrofiële temperaturen waar drijfmest meestal bij wordt opgeslagen in Nederlandse mestkelders. Op basis van de literatuur en expert judgement schatten Dalby et al. (2021) in dat de verschuivingen in type methanogenen tussen psychrofiële naar mesofiele condities zeer waarschijnlijk door vergelijkbare mechanismen als die bij hogere temperaturen zullen plaatsvinden. Tevens verwachten ze dat microbiële populaties met verschillende temperatuuroptima altijd aanwezig zijn, maar dat hun onderlinge verhouding drastisch kan veranderen in reactie op een langdurige temperatuurverandering. Dat neemt overigens niet weg dat er weinig soorten zijn die al onder 20 °C optimaal kunnen groeien (Jablonski et al., 2015), zie Figuur 4.

In de melkveehouderij is weinig onderzoek gedaan naar het verlagen van de temperatuur van mest als strategie om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen.



**Figuur 5** Met de vergelijking van Arrhenius gemaakte grafiek (in snelheid versus inverse temperatuur, K) van de temperatuur-respons van methaan-productie tussen 5-37 °C (Elsgaard et al., 2016).

Safley en Westerman (1994) zagen een lineaire daling van de methaanemissie van varkens- en rundveemest bij een temperatuurdaling 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; dat wil zeggen rundermest gemengd met strooisel (zie voor andere schattingen (Baldé et al., 2016; Elsgaard et al., 2016; Poteko et al., 2019; Sommer et al., 2004)). In een experimentele opstelling met drijfmest gevulde vaten concludeerden Cárdenas et al. (2021) dat tijdens zomer- en winter opslagperiodes, lage (winter)temperaturen consequent lagere CH<sub>4</sub>-productie lieten zien (met een drempel van circa 14 °C). Elsgaard (2016) en zijn collega's beschreven op basis van een lab-experiment eveneens een lineair verband tussen de productiesnelheid van methaan en temperatuur (Figuur 5).

## 1.2 Temperatuur en ammoniakemissie

Hoewel het programma Klimaatenvolop -Integraal Aanpakken van LNV vooral kijkt naar maatregelen om methaan- en andere BKG-emissies te reduceren, moeten deze maatregelen ook in samenhang worden bekeken met andere duurzaamheidseisen en uitdagingen. Zo is het onwenselijk dat ontwikkelde maatregelen als neveneffect hebben dat ze de ammoniakemissie verhogen. Het is juist wenselijk als een maatregel op meerdere fronten een gunstig effect heeft. In dat verband is het relevant dat temperatuur ook de ammoniakemissie beïnvloedt.

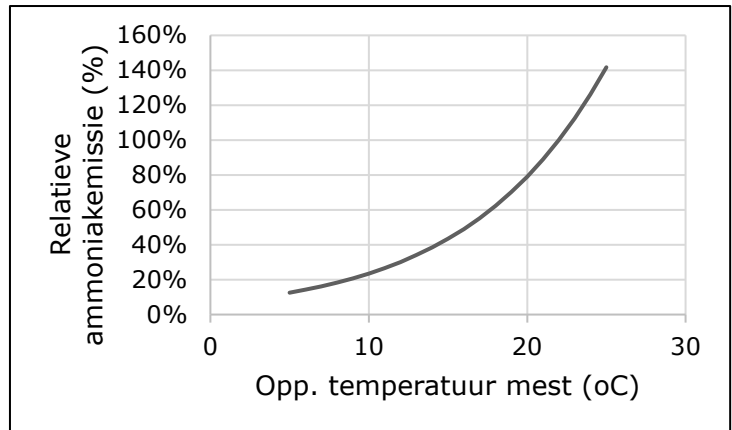
### 1.2.1 Werkingsmechanisme en potentie - NH<sub>3</sub>

Lagere temperaturen in de mest dragen bij aan het verminderen van de ammoniakemissie (Aarnink & Elzing, 1998; Groot Koerkamp et al., 1998; Gustafsson et al., 2005; Wu et al., 2019). In een oplossing (vloeibare fase) zoals urine of drijfmest is ammoniak in evenwicht met ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Om te voorkomen dat NH<sub>3</sub> als gas vervluchtigt kan dit evenwicht tussen ammonium en ammoniak richting ammonium verschoven worden door de temperatuur van mest en urine te verlagen.

Ammoniak ontstaat als ureum in de urine in contact komt met het enzym urease. Dit enzym wordt onder andere geproduceerd door bacteriën die actief zijn in de feces of in de biofilm op vloeren en oppervlakken. Elk enzym-eiwit heeft een optimale temperatuur. De optimale temperatuur voor urease is circa 60 °C. Hoewel de temperaturen in veestallen lager liggen dan deze optimale temperatuur, kan ureum ook bij 15 of 20 °C al snel middels urease worden omgezet.

Modelberekeningen laten zien dat de ammoniakemissie met gemiddeld 6,8% verandert voor elke verandering van 1 °C in de mesttemperatuur (Aarnink & Elzing, 1998). Aarnink et al. (1996) schatten een regressiecoëfficiënt van 0,10 (s.e. 0,02) voor de natuurlijke logaritme van de ammoniakemissie op basis van de drijfmesttemperatuur.

Op basis van emissiemetingen op 17 melkveehouderijbedrijven hebben Ogink et al. (2014) vastgesteld dat een toename van 1 °C van de buitentemperatuur gepaard gaat met gemiddeld 1,5% toename van de ammoniakemissie in deze stallen (die veel opener zijn dan bijvoorbeeld varkenstallen).



**Figuur 6** Modelweergave invloed temperatuur op relatieve ammoniakemissie (%) (Aarnink et al., 2022).

Ammoniakvorming en -emissie wordt door temperatuur beïnvloed en dus kan het koelen van mest een reducerend effect hebben op de ammoniakemissie. Ook andere factoren zoals het ventilatiedebiet kunnen dan belangrijker worden voor de emissie (Snoek, 2016). In de grenslaag net boven de urineplas/mest is de opgeloste  $\text{NH}_3$  in evenwicht met de gasvormige  $\text{NH}_3$ . Dit evenwicht is temperatuurafhankelijk, hogere temperaturen resulteren in een grotere hoeveelheid ammoniakgas. De vervluchtigingssnelheid is o.a. afhankelijk van zowel temperatuur als lichtsnelheid op de grenslaag (Monteny & Erisman, 1998). Ammoniakgas in de grenslaag kan via diffusie naar de lucht er boven vervluchtigen. Dit proces is afhankelijk van het verschil in concentratie tussen  $\text{NH}_3$  in het mest/urinemengsel en in de (onderste) luchtlaag daarboven (Mosquera et al., 2017). In dit stadium kan ook de ammoniakemissie gereduceerd worden door bijvoorbeeld de temperatuur te verlagen en/of de luchtbeweging langs het (urine/mest)oppervlak te reduceren. Dit laatste is het werkingsmechanisme van dichte vloeren, die de luchtuitwisseling tussen de stal en de mestkelders beperken. Daarnaast is temperatuur een factor die de ammoniakemissie beïnvloedt. Het koelen van mest kan de emissie van ammoniak verder beperken, maar zodra de temperatuur weer stijgt kan de omzetting van ureum door het urease-enzym alsnog plaatsvinden.

Wu et al. (2019) rapporteren op basis van een modelberekening dat met koelingssystemen een ammoniakemissiereductie van rond de 40% gerealiseerd kan worden. Een uitdaging bij het koelen van mest is de tijd die nodig is om lagere temperaturen of een temperatuurevenwicht van het gehele mestvolume te bereiken. Mestkoelingssystemen die in de mestkelders worden geïnstalleerd zullen geen invloed hebben op de omzetting van ureum op het vloeroppervlak. Wel op de temperatuur van het mestoppervlak in de kelder, maar daar moet de oppervlaktemperatuur van de mest dan wel snel worden verlaagd. Koelleidingen om warmte te onttrekken die op/in de bovenste lagen van de opgeslagen mest (Mest koelen 2.0, zie Hoofdstuk 2) zijn geplaatst zouden daarom in dit opzicht beter kunnen werken dan leidingen die op/in de bodem van de kelder liggen (Mest koelen 1.0, zie Puente-Rodríguez et al., 2023).

### 1.2.2 Effect van mest mixen?

Een ander belangrijk aspect dat van invloed is op de ammoniakemissie is mest mixen. In dit onderzoek werd mest vaak gemixt om een lage temperatuur van het gehele mestvolume te bereiken en te behouden. Uit de literatuur blijkt dat het mixen van mest negatieve effecten heeft op de ammoniakemissie (Van der Stelt et al., 2007; Calvet et al., 2017). Mest mixen beïnvloedt de vervluchtiging van ammoniak door de oppervlaktekorst af te breken, en door zuurstof in de anaerobe drijfmestomgeving te brengen (Van der Stelt et al., 2007). Deze korsten werken als diffusie- en capillaire barrières (ibid). Calvet en collega's (2017) rapporteerden dat het mixen van drijfmest in een experiment de pH van de toplaag eerst verlaagde, maar dat er op de lange termijn sprake was van een pH-stijging waardoor de ammoniakemissie toenam. In dat experiment werd een verhoging van de ammoniakemissie van 20% gerapporteerd (ibid.).

---

Een mogelijk tegenargument is dat door de drijfmest te mixen en dus korstvorming te voorkomen een verlaging van het ammoniumgehalte in de toplaag bereikt wordt. Door het mixen mengen zich vers afgevoerde urineplassen sneller met de rest van de mest in de kelder dat een lager ammoniumgehalte heeft. Van Dooren et al. (2019) konden in een experiment op Dairy Campus deze hypothese echter niet onderbouwen.

## 1.3 Experimenten

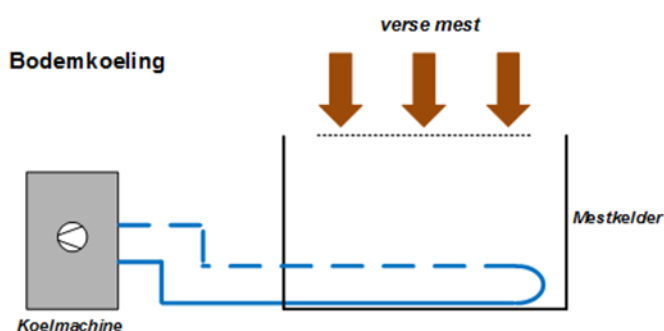
In dit rapport worden twee verschillende mestkoelingssystemen beschreven en geanalyseerd:

1. Drijfmest koelen in mestkelders 2.0 +1.0 (Hoofdstuk 2). Op basis van eerder onderzoek (Punte-Rodríguez et al., 2023) en de daar geleerde lessen met het mestkoelingssysteem 1.0 werd een nieuw prototype ontwikkeld (2.0), geïnstalleerd en gedurende 1 jaar bemeten op één melkveebedrijf in Hellum, Groningen. De belangrijkste aanpassing was de ligging van de koelleidingen. Bij Mest koelen 1.0 lagen de koelleidingen op de bodem van de mestkelder, bij 2.0 dreven deze in de bovenste laag van de opgeslagen mest. Oorspronkelijk was het de bedoeling om alleen het 2.0-systeem te testen. Echter, vanwege de verwarmingsbehoefte van de bedrijfswoning en technische problemen met 2.0 werd in dit experiment het gezamenlijke effect van beide systemen om mest te koelen getest.
2. Extern koelen (Hoofdstuk 3). In dit systeem wordt drijfmest uit de mestkelder gepompt en buiten de mestkelder (extern) gekoeld, waarna de gekoelde drijfmest weer in de mestkelder wordt teruggebracht. Dit systeem werd gebouwd op basis van de geleerde lessen gedurende mest koelen in kelders (prototypen 1.0 en 2.0) en met name vanwege de ervaren problemen in de bedrijfsvoering van de melkveehouder met deze systemen (deze worden in Hoofdstuk 2 beschreven). Een eerste prototype werd gebouwd en geïnstalleerd op een melkveebedrijf in Haulerwijk, Friesland. Daar werden geen emissiemetingen uitgevoerd, maar werd gedurende een korte periode gekeken naar de werking van het systeem in relatie tot de temperatuur van de mest.

## 2 Het koelen van mest door middel van koelleidingen in mestkelders; 2.0 + 1.0

### 2.1 Inleiding

In 2018-2019 is op het melkveebedrijf Zandhoeve Holsteins van de familie Van Tilburg uit Hellum een mestkoelingsinstallatie geplaatst. De melkveehouder ontwierp samen met de bedrijven Geothermica en L'orèl Consultancy, en Melkveehouderij Ballingheim VOF in Holwierde een mestkoelingssysteem. Dit werd ondersteund door een subsidie van de provincie Groningen. Het oorspronkelijke doel was om warmte voor de bedrijfswoning te produceren. 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. Voor een volledige beschrijving van het eerste systeem en de resultaten van dat onderzoek zie Hoofdstuk 2 in Puente-Rodríguez et al., 2023. In het eerste prototype lag het koelleidingsysteem om de warmte aan de mest te onttrekken op de bodem van de (bestaande) mestkelder, zie Figuur 7. Bij het bedrijf in Holwierde waren de koelleidingen tijdens nieuwbouw in de bodem van de mestkelder geïntegreerd.



**Figuur 7** Gesimplificeerd schema Mest koelen 1.0.

Op het bedrijf in Hellum kon een redelijke case-control opstelling ten behoeve van emissiemetingen uit de mestkelders worden gerealiseerd. Het gemiddeld temperatuurverschil van de opgeslagen mest tussen de met het 1.0-systeem gekoelde en de niet gekoelde mestkelders was 2 à 2,5 °C en daarbij werd een reductie van de methaanemissie uit mest van circa 45% gemeten, maar ook een toename van de ammoniakemissie van rond de 75% (ibid.).

Bij het nieuwe prototype (2.0) dreven de koelleidingen in de bovenste laag van de mest, zie Figuur 10. Daarnaast werd in het nieuwe prototype een warmtepomp met een hoger vermogen geïnstalleerd. De belangrijkste argumenten voor deze keuze waren:

- Warmte stijgt. De onderste lagen van de opgeslagen drijfmest worden meer beïnvloed door de temperatuur van grondwater<sup>6</sup> dan de omgevingstemperatuur. Mestkoelingssystemen met de leidingen in de bovenste lagen van de mest presteren meestal beter (zie Wu et al., 2019 voor inschattingen van de prestaties in relatie tot de diepte en de vloeibaarheid/vastheid van de mest).
- De lichaamstemperatuur van melkkoeien is ca. 38,5 °C. Dit betekent dat de verse mest die voortdurend in de kelder terechtkomt dan ook een hogere temperatuur heeft dan de al aanwezige/opgeslagen mest.

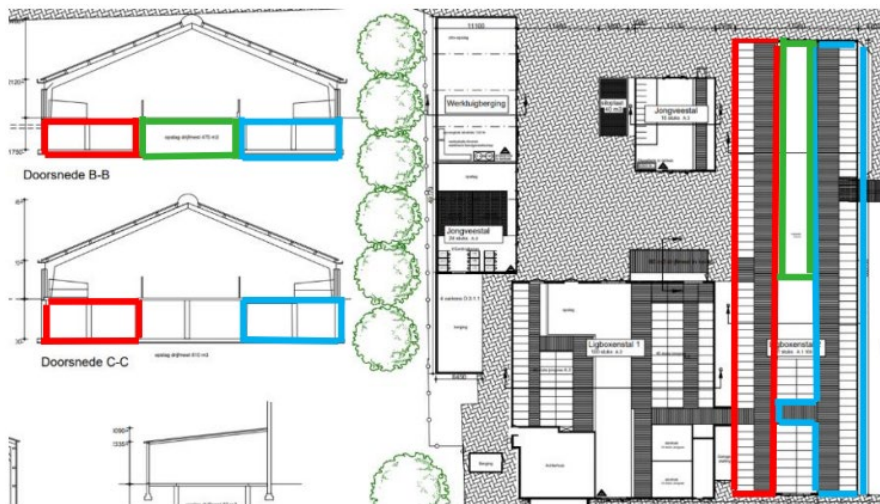
<sup>6</sup> Op 10 meter diepte heerst een constante temperatuur van rond 10 °C, dat verder toeneemt in diepere lagen.

- De koelleidingen lagen in het eerste prototype op de bodem, waardoor de warmte-onttrekking met name plaatsvond in de onderste laag mest die in direct contact met de koelleidingen stond. Warmte-onttrekking is zo minder efficiënt, omdat de warmere verse mest zich bovenin bevindt en deze warmte immers niet naar onderen zakt<sup>7</sup>.
- Ammoniakemissie uit opgeslagen mest vindt plaats op de overgangszone tussen mest en lucht. De veronderstelling was dat directe koeling van de bovenste laag een beter reducerend effect op de ammoniakemissie zou hebben.
- Door de warmere toplaag van de drijfmest te koelen werd ook verwacht dat er minder vaker gemixt zou hoeven te worden, om de temperatuur door het gehele volume homogeen te bereiken en te behouden.

De doelstelling van deze studie was om inzicht te krijgen in de praktische uitvoerbaarheid en het bemeten van een systeem om mest te koelen (< 8 °C of in ieder geval onder de 10 °C) in bestaande melkveestallen, en om vast te stellen of de methaanemissie uit mest met meer dan 50% afneemt. En om ervoor te zorgen dat de ammoniakemissie in ieder geval niet zou toenemen, maar bij voorkeur zou worden gereduceerd. Om dit te bereiken was het de bedoeling om alleen het 2.0-systeem te testen. Hierdoor zou een vergelijking tussen beide systemen mogelijk zijn. Om redenen die in dit rapport worden uitgelegd werden systemen 1.0 en 2.0 echter gelijktijdig getest.

## 2.2 Melkveebedrijf-, testopstelling- en systeembeschrijving

Het melkveebedrijf van de familie Van Tilburg in Hellum (Zandhoeve Holsteins) huisvest de melkgevende koeien in een natuurlijk geventileerde ligboxenstal (1.052 m<sup>2</sup>), met daarin twee rijen ligboxen met koematrassen. Het bedrijf heeft daarnaast nog andere gebouwen voor bijvoorbeeld droogstaande koeien. De bedrijfswoning bevindt zich ook op het bedrijfsterrein. De Holstein-Friesian melkveestapel bestond tijdens het experiment uit circa 168 melkkoeien waarvan circa 33 vaarzen en circa 27 droogstaande koeien, met daarnaast ongeveer 81 stuks jongvee. De melkkoeien hadden een gemiddeld levend gewicht van circa 675 kg (gebaseerd op inschattingen van de melkveehouder). De bedrijfsgemiddelde melkproductie was 9.000 kg per koe per jaar (4,23% vet en 3,49% eiwit). Het rantsoen bestond uit ingekuild gras (60%), maïs (20%) en een krachtvoersupplement – 20% enkelvoudige grondstoffen. Vanaf half maart stonden de melkkoeien overdag in de wei. Vanaf half april tot begin oktober stonden ze dag en nacht buiten en kwamen 2 keer per dag om gemolken te worden en stonden circa 1,5 uur op stal voor voer. Ze waren in deze periode dus ongeveer 3 uur per dag in de stal aanwezig. De rest van het jaar stonden ze op stal. Het bedrijf heeft 70 ha grasland en 14 ha voor de productie van maïs.



**Figuur 8** Doorsnedes B-B en C-C (links) van de stal waar het onderzoek werd uitgevoerd. In de plattegrond van deze stal (rechts) en bij de doorsnedes, in rood, de referentie mestkelder en in blauw de gekoelde mestkelder. Groen, niet-gekoelde en niet-onderzochte tussen-mestkelder.

<sup>7</sup> Dit geldt dus vooral voor de bovenlaag. Daar staat echter tegenover dat de koelcapaciteit, in principe, hoger zal moeten zijn doordat verlies naar de omgevingslucht optreedt.

De melkveestal heeft een traditionele betonnen roostervloer voorzien van een mestschuif met daaronder mestkelders voor de opslag van drijfmest. Aan weerszijden van de voergang bevonden zich vergelijkbare stalgedeeltes (dus ook mestkelders) zodat een case-control testopstelling gerealiseerd kon worden om het effect van koelen te kunnen vaststellen, zie Figuur 8. In de blauw gemarkeerde kelder werden koelleidingen gemonteerd in het deel onder de roostervloer maar niet in het gedeelte dat onder de ligboxen doorloopt. In deze kelder werd hiermee de mest gekoeld ('case'). De andere rood gemarkeerde kelder werd niet gekoeld en fungeerde als referentie of 'control'. De gekoelde mestkelder is 64 m lang, 4,65 breed, heeft een oppervlak van circa 298 m<sup>2</sup> en is deels 1,5 en deels 2 m diep. De niet gekoelde mestkelder had vergelijkbare dimensies. De keldermuren waren niet geïsoleerd. Met ondersteuning van de melkveehouder werd geprobeerd om het volume aan mest in beide kelders gelijk te houden. Er waren twee hoog-liggende openingen<sup>8</sup> (circa 0,8 m hoog, 2 m breed) tussen case en control kelders en tussen de niet gekoelde groen gemarkeerde tussen-mestkelder (Figuur 8) waarlangs bij volle kelders mest tijdens het mixen van de ene naar de andere kelder zou kunnen worden uitgewisseld. Om dit te voorkomen is een schot tussen de gekoelde kelder en de tussenliggende kelder geplaatst (zie foto hiernaast)<sup>9</sup>.



De opslagcapaciteit van deze mestkelders is met het genoemde aantal koeien 5 maanden. De mest werd gemixt met elektrische mixers. Meestal wordt in dit soort stallen ergens tussen één keer per week en één keer per maand (rond 1-2 uur per keer) mest gemixt om het te homogeniseren en de verpompbaarheid te vergemakkelijken. In dit onderzoek heeft 'mest mixen' ook een functie in het koelsysteem om een homogene temperatuur van de mestmassa te bereiken. Daarom werden de mixers tijdens dit onderzoek twee keer per dag gedurende 10 minuten aangezet. Hetzelfde mestmix-regime werd toegepast in de case en control mestkelders. Deze hoge frequentie van mestmixen is niet de praktijk in de gangbare melkveehouderij. In de gekoelde mestkelder was mixen nodig om een lage mesttemperatuur van het totale mestvolume te bereiken en te behouden. In dit onderzoek is er voor gekozen om ook in de referentiemestkelder evenveel te mixen om het effect van mest koelen op zichzelf goed te kunnen beoordelen. Door in beide mestkelders te mixen kan ervan uit gegaan worden dat de temperatuur- en emissieverschillen tussen case en control kelders het gevolg zijn van mest koelen. Aan het einde van de onderzoeksperiode werd door vaker mixen geprobeerd de prestatie van het 2.0-systeem in de gekoelde kelder (ten aanzien van mesttemperatuur) te verbeteren en ook de gevormde mestkorst te verwijderen of in ieder geval te verminderen (zie hieronder, paragraaf 2.5.2).

Op de drijfmest dreef het 2.0-systeem van koelleidingen om de warmte aan de mest te onttrekken, zie Figuur 10. Er werden 4 drijvende koelleidingen van elk 100 meter lengte geplaatst (op 20 mei 2021). Ze waren ieder aangesloten op een eigen verdeler (Foto 1). Boeien werden gebruikt om deze leidingen te laten drijven (Foto 1). Het idee achter dit drijvende ontwerp is dat het experiment/systeem de normale dagelijkse werkzaamheden in het melkveebedrijf niet zou belemmeren en mee kon bewegen met het stijgen van het mestniveau in de kelder door de aanwezigheid van melkvee in de stal, of het dalen van het volume door het leegmaken van de kelder om mest uit te rijden.

<sup>8</sup> Deze openingen worden gebouwd om te zorgen dat er geen overmatige druk op de muren tussen de mestgangen in de kelder ontstaat. Mocht een gang te vol raken, dan kan de mest via de opening overstromen naar de andere mestgang.

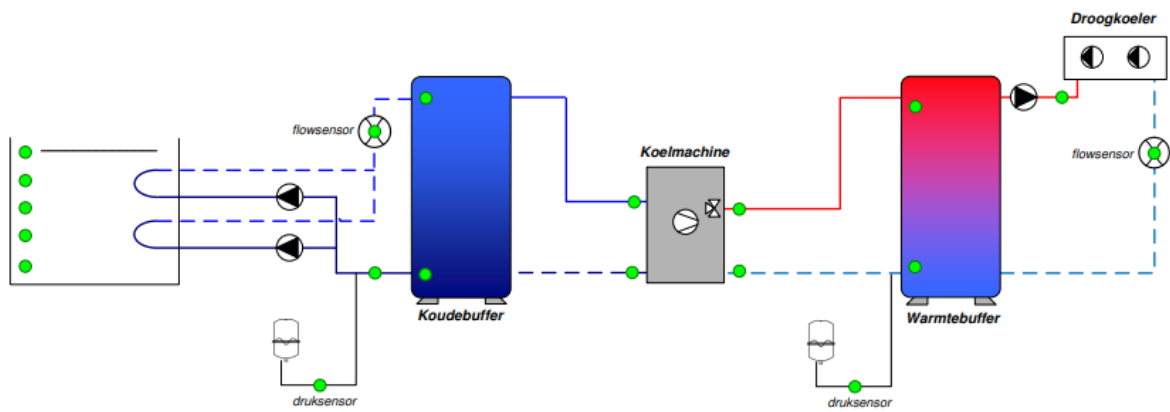
<sup>9</sup> Recent, 2023, is opgemerkt dat dit systeem niet waterdicht is.





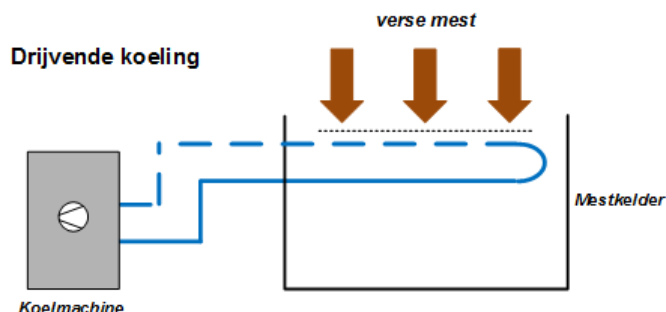
**Foto 1** Mest koelen 2.0 (drijvende koelleidingen): gebruikte boeien (boven links en midden), koelleidingen met boeien voor plaatsing (rechtsboven), leidingen met koelvloeistof in mestkelder (beneden) en aansluiting aan koelunit (beneden rechts).

### Mestkoeling 2.0



**Figuur 9** Schema mestkoelingsysteem in kelders 2.0. Bron: Geothermica.

Door de koelleidingen (Powerwave PE100RC, met een diameter van 63 mm) stroomde een mengsel van water (75-80%) en glycol (20-25%). Een elektrische warmtepomp (MasterTherm warmtepomp met 48 kW vermogen) onttrok de warmte van de mest via de koelleidingen. Deze warmte werd geloosd op de buitenlucht met behulp van een droogkoeler. De hoofdelementen van het systeem (Figuur 9) waren, van koud naar warm: koelleidingen + circulatiepomp - koude buffer 1.000 liter - warmtepomp (MasterTherm AQ90i) - warmtebuffer 1.000 liter, circulatiepomp, en een droogkoeler om de overtollige warmte te lozen.



**Figuur 10** Gesimplificeerd schema mest koelen 2.0.

Tijdens het experiment met Mest koelen 2.0 in Helling ging de droogkoeler stuk door bevriezing na een storing. Aangezien het experiment met extern koelen in Haulerwijk (zie daarover Hoofdstuk 3) al was afgerond kon de droogkoeler die daar aanwezig was naar Helling worden gebracht. De geleerde les hieruit was dat ook aan de warme kant van het systeem glycol noodzakelijk is. Tot dat moment werd er namelijk aan die zijde alleen water gebruikt. Bij stroom- of systeemstoringen vallen ook de pompen uit die voorkomen dat de droogkoeler kan bevriezen. Vanaf dat moment is dit in deze studie een standaardprocedure geworden.

### 2.2.1 Mest koelen 1.0 aan tijdens het experiment met 2.0

De bedrijfswoning werd verwarmd met warmte uit de melkkoelingsinstallatie. Echter leverde deze niet voldoende warmte. Het tekort werd aangevuld met onttrokken warmte uit de mest door het mestkoelingsysteem 1.0. Bovendien ging tijdens het experiment de cv-pomp van de bedrijfswoning stuk waardoor (het aandeel van) de behoefte aan warmte uit de mest groter werd. Verder functioneerde het 2.0-systeem vanwege de ijs- en korstvorming rondom de drijvende koelleidingen en andere technische problemen onvoldoende voor het experiment. In verschillende periodes (van gemiddeld circa 4,7 uur) over de duur van dit experiment (24-05-2021 en 12-04-2022) was het 1.0-systeem in totaal circa 5.707 uur (oftewel 237,8 dagen) actief.

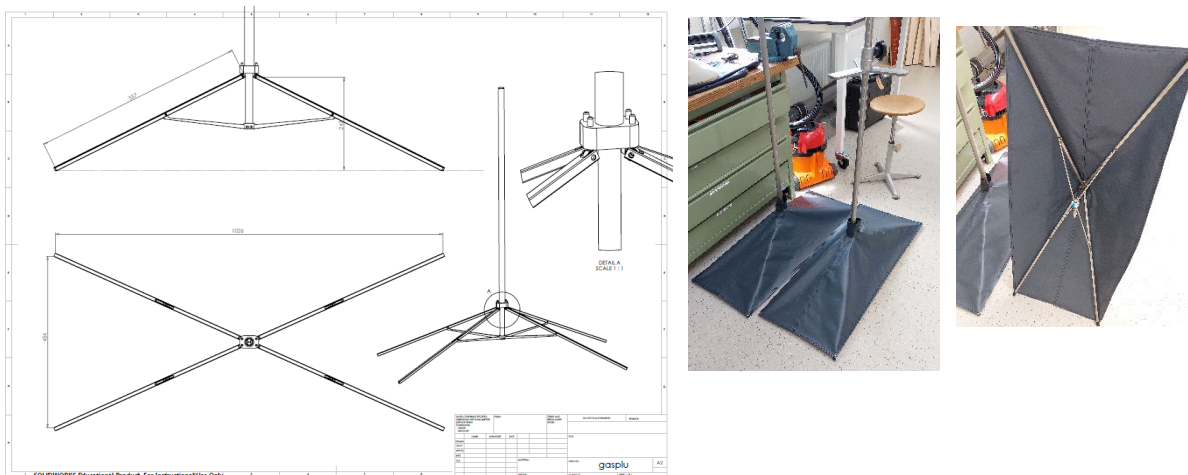
Het 1.0-systeem (bodemkoeling, zie Figuur 7) werkte met een Wolf warmtepomp met 16,8 kW verwarmingsvermogen. Deze warmtepomp koelde via een cv-pomp een buffervat dat afwisselend voor de melktank en de mestkoeling werd benut. Het koelsysteem 1.0 in de mestkelder bestond uit een leidingsysteem (200 m) 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 (Puentes-Rodríguez et al., 2023).

## 2.3 Methodologie – Broeikasgas- en ammoniak-emissiemetingen

In dit melkveebedrijf werd gewerkt met een case-control testopstelling (zie Sectie 2.2 hierboven en Figuur 8). De melkkoeien konden vrij bewegen boven deze kelders en hadden allen hetzelfde voerregime. Met hulp van de melkveehouder bleven de mestniveaus en de leeftijd van de mest tussen case en control tijdens het experiment ook gelijk.

Verspreid over een jaar werden zes emissiemetingen uitgevoerd om eventuele seizoensinvloeden mee te kunnen nemen in het onderzoek. Op deze dagen werden ook temperatuurmetingen van de mest uitgevoerd. Er werd een vergelijkbaar aantal temperatuurmetingen uitgevoerd op verschillende locaties in de case en control mestkelders en per locatie op verschillende hoogtes (zie Tabel 4). Concreet werd op elke locatie de temperatuur gemeten in stappen van 20 cm diepte. In werkelijkheid werd er op zeven dagen gemeten maar van één daarvan zijn de resultaten vanwege technische problemen aan het meetsysteem niet meegenomen in de analyse.

Emissies van de broeikasgassen methaan ( $\text{CH}_4$ ) en lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) en ook de ammoniakemissie uit de opgeslagen mest werden (case-control) gemeten. Omdat zowel de proef- als de controlesituatie in dezelfde stal aanwezig waren konden de emissies niet op stalniveau worden bepaald. Bovendien was het de bedoeling het enterisch gevormde methaan en de ammoniakemissie vanaf de roostervloer uit te sluiten. Daarom werden de emissiemetingen onder de roostervloer op het mestoppervlak uitgevoerd met een zogenaamde 'meetparaplu', afgebeeld in Figuur 11. Dit is een alternatief voor het (zonodig loszagen en) demonteren van zware betonnen roosterelementen, wat vereist is om fluxkamers<sup>10</sup> toe te kunnen passen. Een gesloten meetparaplu past door de spleten van een roostervloer (afhankelijk van de uitvoering/grootte tot zelfs een spleetbreedte van 10 mm) en werd op maat gemaakt op de breedte van de desbetreffende spleet. Om de paraplu onder de roosters te kunnen openen mogen de kelders echter niet volledig zijn gevuld met mest, een ruimte van 35-tot 60 cm boven het mestoppervlak is nodig om de paraplu te kunnen openen.



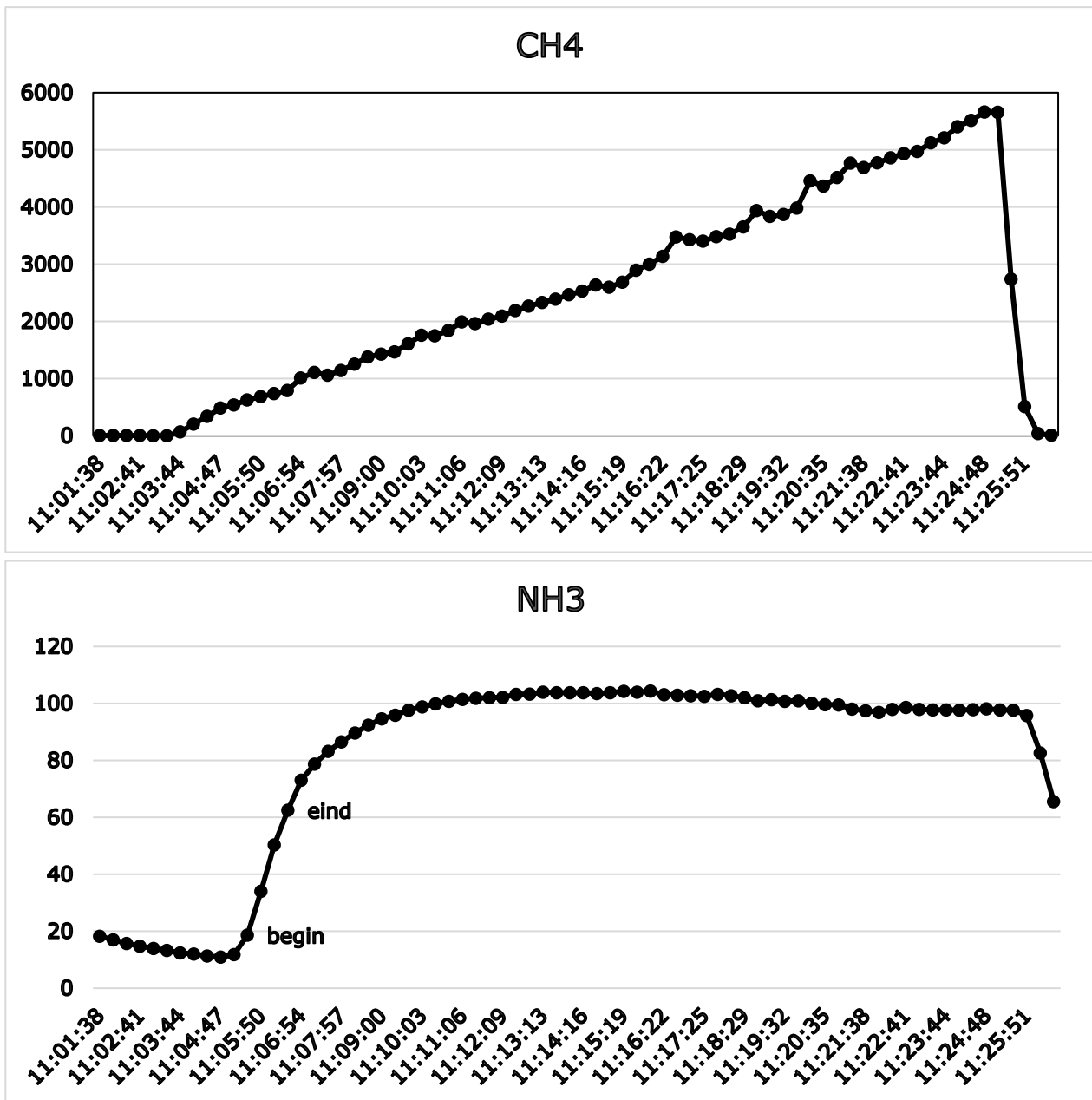
**Figuur 11** Meetparaplu-ontwerp (links, bron: Technical Development Studio – WUR) en foto's (rechts).

Elke meetdag werden metingen uitgevoerd op 6 plekken per mestkelder (case en control). De paraplumetingen werden uitgevoerd in twee of drie clusters van 1-3 metingen op minimaal 2 meter vanaf de gevel en halverwege de stal. Per keer werden in beide mestkelders vergelijkbare meetpunten aangehouden min of meer in het midden van het mestkanaal. Op deze locaties waren de spleten van de roosterplaten breed genoeg of had de melkveehouder de roosters zo aangepast dat de paraplu door de roosterspleten paste. Als het mestniveau tijdens een meetdag te hoog was voor paraplumetingen door de roosters en de situatie dat toeliet, werden de roosters verwijderd - maximaal 4 roosters, 2 aan elke kant van de stal.

De concentratie(-opbouw) onder de paraplu is op het melkveebedrijf 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 Calcmeter (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 databestand 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.

<sup>10</sup> Ook bekend als boxmeting of Lindvalldoos.

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. Figuur 12 geeft een voorbeeld van een (geslaagde) meting.



**Figuur 12** Voorbeeld van CH<sub>4</sub>- en NH<sub>3</sub>-meting met de meetparaplu (referentiekelder, 15-09-2021). Bij CH<sub>4</sub> werden de metingen een minuut na het begin en voor het einde van de genoteerde meetperiode gebruikt voor het berekenen van de emissie. Voor NH<sub>3</sub> werd dit visueel bepaald op basis van het afbuigen van de lijn, hier aangegeven met de labels begin en eind.

De emissie bij deze statische meetmethode met de meetparaplu werd 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 door de concentratie in de ruimte, werd hier visueel de periode waarin emissiesnelheid stabiel was vastgesteld. Vervolgens werd de emissie uitgedrukt in mg/m<sup>2</sup>/u volgens:

$$[(\text{Concentratie eind} - \text{concentratie begin}) / \text{meetduur in seconden}] \times 3.600 \times \text{conversiefactor ppm naar mg} \times (0,032/0,4308)$$

Waarin 3.600 het aantal seconden in een uur is, en 0,032 en 0,4308 respectievelijk de inhoud en de oppervlakte van de paraplu zijn. Verder zijn de volgende factoren toegepast voor conversie van 1 ppm naar mg: 0,67 mg CH<sub>4</sub>, 0,71 mg NH<sub>3</sub> of 1,83 mg N<sub>2</sub>O (soortelijke gewichten bij 20 °C en 1013,25 mbar).

Met de FTIR-techniek is het op deze wijze mogelijk om onderzoek uit te voeren naar emissiepatronen van allerlei verschillende gassen en componenten die hierbij een rol spelen. In deze verkennende studie zijn behalve CH<sub>4</sub> daarnaast alleen NH<sub>3</sub> en N<sub>2</sub>O onderzocht. Bij de beoordeling van stijglijnen werd mede gekeken naar CO<sub>2</sub>, maar de emissies van dit gas zijn hier niet gerapporteerd omdat ze deel uitmaken van de zogenaamde korte kringloop. Zoals eerder gerapporteerd (Puentes-Rodríguez et al., 2023) moest als gevolg van de hoge concentraties die onder de paraplu waargenomen werden het meetbereik van de FTIR-monitor uitgebreid worden. Daarbij bleek het ook noodzakelijk voor andere componenten te gaan compenseren en werden verschillende software-upgrades en onderhoudsbeurten uitgevoerd.

### 2.3.1 Analyse mestmonsters

Tijdens de meetdagen werden mestmonsters verzameld uit de case en control kelder. Voor de monstername werd een Eijkkelkamp 'multisampler' gebruikt. De diameter van de transparante monsterbuis was 30 mm. Om een representatief mestmonster te verzamelen werd de monstername als volgt uitgevoerd. Op minimaal 6 locaties verspreid over de mestkelder werden mestmonsters (deelmonsters) van de gehele mestkolom genomen. Deze werden verzameld in een emmer en gemengd, waaruit vervolgens de monsternamepotjes gevuld werden.

In het laboratorium van WLR zijn de volgende parameters geanalyseerd: totaal stikstof (N), ammonium-N (NH<sub>4</sub>-N), totaal fosfor (P), kalium (K), droge stof (ds) en anorganische stof (as). De mestmonsters zijn in het lab geanalyseerd conform gangbare normen, zie onderstaande tabel. De resultaten werden per element met eenzijdige t-testen beschouwd om te toetsen op statistisch significante verschillen tussen case en control.

**Tabel 1** 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 destruat  | <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 destruat  | <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 destruat  | <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>   |

## 2.4 Resultaten

### 2.4.1 Temperatuur

Van de gekoelde en niet gekoelde mestkelder is tijdens de meetdagen een temperatuurprofiel gemaakt. De resultaten zijn samengevat in Tabel 3.

De doelstelling was om de mesttemperatuur naar 8-10 °C te brengen en te houden. Gemiddeld gesproken werden deze waarden in de gekoelde kelder wel bereikt. Tijdens de meetreeks was de gemiddelde temperatuur van de gekoelde mest 9,3 °C. Bij de referentiekelder werd een gemiddelde temperatuur van 13,1 °C gemeten. Het verschil tussen case en control was dus gemiddeld 3,8 °C.

Alleen op de meetdagen in september en oktober lag de gemiddelde temperatuur in de gekoelde mest boven 10 °C. In de gekoelde kelder werden aanzienlijke verschillen tussen de temperatuur op de bodem en op het mestoppervlak waargenomen, incidenteel oplopend tot 10 °C verschil. Dit temperatuurverschil was in de referentiemestkelder maar zeer beperkt, zie Tabel 3. Tabel 2 geeft de gemiddelde temperaturen van de maanden in 2021 en 2022 volgens de KNMI-weerstation Nieuw Beerta weer.

**Tabel 2** *Maandgemiddelde temperatuur (°C) KNMI weerstation Nieuw Beerta, normaal en tijdens de maanden van dit onderzoek.*

|                | <b>Normaal</b> | <b>Experiment</b> |
|----------------|----------------|-------------------|
| April 2021     | 9,9            | 5,8               |
| Mei 2021       | 13,4           | 10,4              |
| Juni 2021      | 16,2           | 17,4              |
| Juli 2021      | 18,3           | 18,1              |
| Augustus 2021  | 17,9           | 16,9              |
| September 2021 | 14,7           | 15,7              |
| Oktober 2021   | 10,9           | 11,3              |
| November 2021  | 7,0            | 7,2               |
| December 2021  | 4,2            | 4,0               |
| Januari 2022   | 3,6            | 5,1               |
| Februari 2022  | 3,9            | 5,8               |
| Maart 2022     | 6,5            | 5,8               |
| April 2022     | 9,9            | 8,0               |
| Mei 2022       | 13,4           | 13,1              |

**Tabel 3** Samenvatting van gemiddelde mesttemperaturen (°C) tijdens de meetdagen. Met een kleurschaal van blauw (koudst) naar rood (warmst) wordt het temperatuurverschil van de opgeslagen mest weergegeven, gemiddelde waarden in groen. Na het groei/bemesting seizoen was er in de kelders in de maanden augustus, september en oktober minder mest.

|            | Gekoeld |      |      |      |      |       |       |       |       |      | Gem  | Referentie |      |      |      |      |       |       |       |       |      | Gem  |
|------------|---------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|
|            | opp     | -    | -    | -    | -    | -     | -     | -     | -     | Bode |      | opp        | -    | -    | -    | -    | -     | -     | -     | -     | bode |      |
|            | .       | 20cm | 40cm | 60cm | 80cm | 100cm | 120cm | 140cm | 160cm | m    | .    | .          | 20cm | 40cm | 60cm | 80cm | 100cm | 120cm | 140cm | 160cm | m    | .    |
| 04-08-2021 | 11,6    | 10,0 |      |      |      |       |       |       |       | 5,8  | 9,1  | 16,3       | 15,6 |      |      |      |       |       |       |       | 15,3 | 15,7 |
| 15-09-2021 | 15,9    | 9,9  | 9,7  |      |      |       |       |       |       | 5,8  | 10,3 | 19,0       | 18,0 |      |      |      |       |       |       |       | 16,6 | 17,9 |
| 06-10-2021 | 13,4    | 10,4 | 10,5 | 10,6 |      |       |       |       |       | 7,3  | 10,4 | 15,1       | 15,6 | 16,0 |      |      |       |       |       |       | 15,8 | 15,6 |
| 08-12-2021 | 10,8    | 10,3 | 9,9  | 9,1  | 8,9  | 9,3   | 9,1   | 10,0  |       | 9,4  | 9,6  | 10,5       | 11,2 | 11,9 | 12,4 | 12,7 | 12,7  | 13,1  |       |       | 13,0 | 12,2 |
| 09-02-2022 | 12,5    | 11,6 | 11,2 | 10,5 | 9,1  | 7,7   | 6,4   | 5,8   | 7,9   | 5,8  | 8,9  | 12,8       | 12,4 | 12,3 | 12,2 | 12,2 | 12,2  | 12,1  | 12,2  |       | 12,4 | 12,3 |
| 02-03-2022 | 10,6    | 10,6 | 10,7 | 9,6  | 8,8  | 8,6   | 8,6   | 8,8   | 8,9   | 7,7  | 9,3  | 10,9       | 11,5 | 11,9 | 11,9 | 12,0 | 12,0  | 11,9  | 11,8  |       | 12,0 | 11,8 |
| 30-03-2022 | 11,3    | 11,3 | 10,5 | 8,9  | 6,7  | 6,7   | 6,6   | 7,2   |       | 7,1  | 8,5  | 10,7       | 11,7 | 12,1 | 12,5 | 12,6 |       |       |       |       | 12,3 | 12,0 |
| Gem.       | 12,3    | 10,6 | 10,4 | 9,7  | 8,4  | 8,1   | 7,7   | 8,0   | 8,4   | 7,0  | 9,3  | 13,6       | 13,7 | 12,8 | 12,3 | 12,3 | 12,3  | 12,3  | 12,0  |       | 13,9 | 13,1 |

## 2.4.2 Emissies

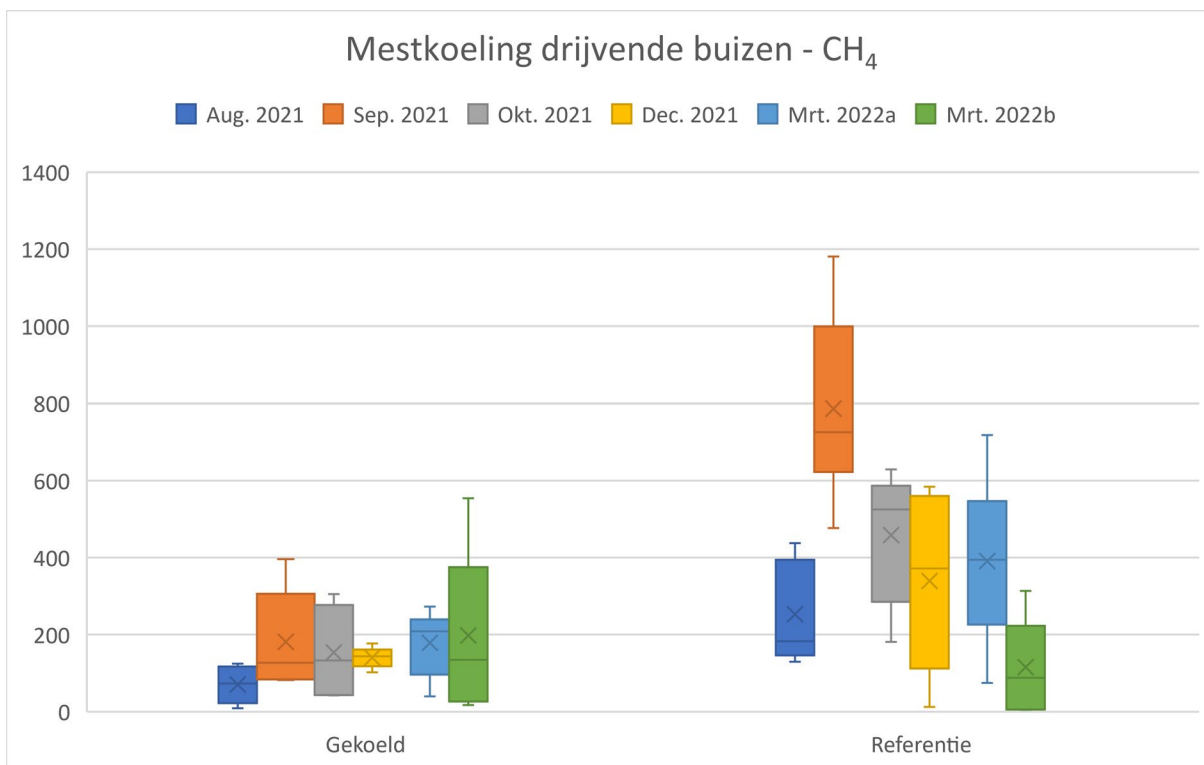
Resultaten van de paraplumetingen zijn cijfermatig samengevat in Tabel 4. Voor de methaanemissie wordt dit ook visueel gepresenteerd in Figuur 13. Deze zogeheten boxplots geven inzicht in de variatie en verschillen tussen meetdagen en behandelingen. In dit onderzoek lag de nadruk op methaan (en werden daarom beide kelders dagelijks tweemaal gedurende tien minuten gemixt), maar ter informatie zijn in de bijlage tevens boxplots voor de emissies van ammoniak en lachgas opgenomen.

**Tabel 4** 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. Vanwege technische problemen is de meting op 09-02-2022 mislukt. Op 30-03-2022 bleek het mestniveau in de case te hoog, waardoor gemixt en mest uitgedompt moest worden. Deze meting (blauw) is niet in het gemiddelde meegenomen.

| 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 (%) |
|---------------|---|--|--------------------------------|---|--|--------------------------------|--|---|---------------------------------|
| 4-8-<br>2021  | 183   | 73   | <b>-60</b>                     | 30,5  | 15,2   | <b>-50</b>                     | 0,30   | 0,10  | <b>-66</b>                      |
| 15-9-<br>2021 | 725   | 127  | <b>-82</b>                     | 91,4  | 70,4   | <b>-23</b>                     | 0,49   | 0,18  | <b>-63</b>                      |
| 6-10-<br>2021 | 525   | 133  | <b>-75</b>                     | 43,2  | 63,5   | <b>47</b>                      | 0,10   | 0,10  | <b>10</b>                       |
| 8-12-<br>2021 | 372   | 143  | <b>-61</b>                     | 1,9   | 4,2  | <b>123</b>                     | 0,13   | 0,11  | <b>-19</b>                      |
| 9-2-<br>2022  |   |  |                                |   |  |                                |  |   |                                 |
| 2-3-<br>2022  | 394   | 209  | <b>-47</b>                     | 4,9   | 3,5  | <b>-28</b>                     | n,d,   | n,d,  |                                 |
| 30-3-<br>2022 | 88  | 134  | 53                             | 11,0  | 5,6  | -49                            | 0,04   | 0,02  | -41                             |
| <b>Gem. ±</b> | <b>440 ± 201</b>                                  | <b>137 ± 48</b>                                | <b>-69*</b>                    | <b>34,4 ± 36,3</b>                                | <b>31,4 ± 32,9</b>                             | <b>-9</b>                      | <b>0,26 ± 0,18</b>                                 | <b>0,12 ± 0,04</b>                              | <b>-52**</b>                    |
| <b>SD</b>     |   |  |                                |   |  |                                |  |   |                                 |

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





**Figuur 13** Boxplot van metingen aan wel en niet gekoelde drijfmest. Y-as emissies in mg/m<sup>2</sup>/u CH<sub>4</sub>. Per meetdag en behandeling geven de horizontale lijnen een vijf-getallensamenvatting: van onder naar boven minimum, eerste kwartiel, mediaan, derde kwartiel en maximum. De kruisjes zijn het gemiddelde. Nota bene: zowel de gekoelde en referentie mestkelder werd tweemaal daags gedurende tien minuten gemixt.

De metingen lieten consequent een lagere CH<sub>4</sub>-emissie bij de gekoelde kelder zien. Alleen tijdens de laatste meetdag werd een hogere methaanemissie waargenomen (+ 53%). Op deze dag bleek het mestniveau in de gekoelde kelder te hoog om de meetparaplu te kunnen uitklappen. Teneinde toch te kunnen meten werd gemixt en vervolgens mest uitgepompt. Dit heeft vermoedelijk tot de hogere methaanemissies geleid. Om die reden is het resultaat niet meegenomen in de bepaling van het gemiddelde. De ingeschatte methaanemissiereductie van het mestkoelingssystemen 1.0 + 2.0 uit deze meetreeks was 69% (Tabel 4). Zouden we deze laatste meetdag wel hebben meegenomen, dan zou de reductie 64% hebben bedragen.

In het experiment uit 2020 met alleen het 1.0-systeem op dit bedrijf werd een reductie van de methaanemissie van 45% tussen case en control bereikt (Puente-Rodríguez et al., 2023).

Ten aanzien van de ammoniakemissie zijn er wisselende resultaten, soms positief en soms negatief. Gemiddeld in de meetreeks werd een 9% lagere ammoniakemissie in de gekoelde mestkelder waargenomen, maar dit verschil was niet statistisch significant. Voor lachgas werd een trend gevonden voor een statistisch verschil ( $P = 0,09$ ), waarbij de emissie in de gekoelde situatie gemiddeld 52% lager was. Het verschil in N<sub>2</sub>O komt voort uit de eerste twee meetdagen, een mogelijke verklaring is niet gevonden al waren er afwijkingen in de mestsamenstelling bij de referentiekelder, zie de volgende paragraaf.

### 2.4.3 Mestmonsters

In Tabel 5 worden de analyseresultaten van de mestmonsters gegeven. De analyseresultaten van de eerste drie meetdagen laten opvallend hoge ds- en as-gehalten voor de referentiekelder zien. Volgens het lab betrof het zand. De veehouder bevestigde dat zich hier een bezinklaag gevormd had. Vanwege het mixen/uitpompen op de laatste meetdag zijn de analyseresultaten van die dag eveneens minder representatief.

Toetsing van de gehele set met eenzijdige t-tests wijst evenwel op een significant verschil in totaal-N tussen de gekoelde en referentie kelders ( $p$ -waarde 0,014).

Dit strookt met de gemiddeld lagere NH<sub>3</sub>-emissies uit de gekoelde kelder, maar hiermee kan slechts een beperkt deel van dit verschil worden verklaard. Een andere verklaring is hier niet direct voor te geven. Er is sprake van één productiegroep die zich vrijelijk over de stal kon verdelen, en aan weerszijden werd hetzelfde rantsoen verstrekt.

Gemiddeld is de OS (bepaald als ds-as) met 76,6 tegen 69,5 g/kg voor de gekoelde mest ook hoger maar dit verschil is niet significant. Op de vierde tot en met zesde meetdag lijkt er wel een duidelijk verschil te zijn maar het aantal waarnemingen is te klein om daar conclusies aan te verbinden. Het as-gehalte was significant hoger voor de referentiekelder (p-waarde 0,045) en er was een trend voor een verschil in het droge stofgehalte (p-waarde 0,099), wat te wijten was aan zand in de kelder van de referentiesituatie.

**Tabel 5** *Analyseresultaten mestmonsters. Op 30-03-2022 bleek het mestniveau in de case te hoog, waardoor gemixt en mest uitgepompt moest worden. Deze meting is niet in het gemiddelde meegenomen.*

|                  | Datum                  | totaal-N<br>g/kg    | ammonium-N<br>g/kg | P<br>g/kg          | K<br>g/kg          | droge stof<br>g/kg      | OS (ds – as)<br>g/kg | pH<br>g/kg         |
|------------------|------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|
| Gekoelde mest    | 4-8-21                 | 3,67                | 1,58               | 0,61               | 4,28               | 105,6                   | 70,8                 | 7,2                |
| Referentie mest  |                        | 3,80                | 1,44               | 0,83               | 4,30               | 168,0***                | 78,7                 | 7,2                |
| Gekoelde mest    | 15-9-21                | 4,14                | 1,52               | 0,90               | 4,39               | 110,3                   | 86,3                 | 7,0                |
| Referentie mest  |                        | 3,94                | 1,69               | 0,91               | 4,99               | 195,9***                | 77,8                 | 7,2                |
| Gekoelde mest    | 6-10-21                | 4,52                | 2,23               | 0,77               | 5,640              | 117,8                   | 72,9                 | 7,8                |
| Referentie mest  |                        | 3,99                | 1,76               | 0,88               | 4,41               | 186,8***                | 71,6                 | 7,3                |
| Gekoelde mest    | 8-12-21                | 4,29                | 1,54               | 0,77               | 5,22               | 113,2                   | 79,8                 | 7,3                |
| Referentie mest  |                        | 3,51                | 1,50               | 0,69               | 4,31               | 98,6                    | 66,3                 | 7,1                |
| Gekoelde mest    | 9-2-22                 | 4,05                | 1,46               | 0,72               | 4,61               | 101,0                   | 76,3                 | 7,2                |
| Referentie mest  |                        | 3,54                | 1,63               | 0,64               | 4,33               | 87,1                    | 63,0                 | 7,2                |
| Gekoelde mest    | 2-3-22                 | 3,96                | 1,43               | 0,66               | 4,84               | 100,0                   | 73,3                 | 7,0                |
| Referentie mest  |                        | 3,52                | 1,62               | 0,65               | 4,75               | 85,7                    | 59,4                 | 7,1                |
| Gekoelde mest    | 30-3-22                | 4,33                | 1,51               | 0,70               | 4,51               | 107,6                   | 85,6                 | 7,0                |
| Referentie mest  |                        | 4,42                | 1,48               | 0,77               | 4,54               | 119,0                   | 94,4                 | 7,0                |
| <b>Gem. ± SD</b> | <b>Gekoelde mest</b>   | <b>4,10 ± 0,29*</b> | <b>1,62 ± 0,30</b> | <b>0,74 ± 0,10</b> | <b>4,83 ± 0,52</b> | <b>107,98 ± 7,05**</b>  | <b>76,6 ± 5,7</b>    | <b>7,25 ± 0,3</b>  |
| <b>Gem. ± SD</b> | <b>Referentie mest</b> | <b>3,72 ± 0,22*</b> | <b>1,60 ± 0,12</b> | <b>0,77 ± 0,12</b> | <b>4,51 ± 0,29</b> | <b>137,01 ± 51,97**</b> | <b>69,5 ± 7,9</b>    | <b>7,17 ± 0,07</b> |

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

\*\*\* Zand in het monster.

## 2.5 Belangrijke aspecten voor inpasbaarheid in de melkveehouderij

In deze paragraaf worden drie aspecten toegelicht die belangrijk zijn voor de implementatie in de melkveehouderij van mestkoelingsystemen met koelingsleidingen in bestaande kelders, namelijk: investerings- en operationele kosten, praktische aspecten en institutionele aspecten.

### 2.5.1 Economische kosten en baten

#### 2.5.1.1 Kosten

De inschatting van de investeringskosten van het nieuwe 2.0-systeem (voor installatie in alle drie de kelders in de stal zoals die hier is beschreven) is als volgt opgebouwd.

De technische container met alle benodigde elementen (de koelunit) komt op ongeveer 55.000 euro excl. BTW. Koelleidingen, meetapparatuur/regeling, aansluiten, etc. rond 45.000 euro excl. BTW. Mogelijke aanpassing stal rond 10.000 euro excl. BTW. De totale investeringskosten voor Mest koelen 2.0 zouden op een bedrag van rond 110.000 euro excl. BTW komen (persoonlijke communicatie, leverancier). Het gaat hier om een experimenteel prototype en de prijzen zijn daarop gebaseerd. De prijzen van materialen als warmtepompen, zeecontainers etc. kunnen sterk variëren.

De investeringskosten voor het mestkoelingssysteem 1.0 werden geschat op circa 135.000 euro excl. BTW (Punte-Rodríguez et al., 2023). Nota bene: de koelunit van het 2.0-systeem zou een gecombineerd systeem (1.0 +2.0) kunnen bedienen en zou zelf een betere prestaties kunnen leveren omdat deze warmtepomp meer vermogen had.

De belangrijkste post in de jaarlijkse kosten van het mestkoelingssysteem is het elektriciteitsverbruik. De warmtepomp van het 2.0-systeem was de grootste energiegebruiker (>50%). In totaal werd tijdens het experiment rond de 27.226 kWh verbruikt om de mest in de casekelder te koelen. Met de elektriciteitsprijzen van destijds kwam dat neer op 6.263 euro in  $\approx$  1 jaar.

**Tabel 6** *Elektriciteitsverbruik (kWh) tijdens het experiment en de daarbij behorende kosten volgens de elektriciteitsprijs tijdens de aangegeven periode.*

| Onderdeel      | kWh           | Periode                   | Kosten € (kWh*0,23) |
|----------------|---------------|---------------------------|---------------------|
| Warmtepomp 2.0 | 15.818        | 24-05-2021 tot 12-04-2022 | 3.639               |
| Warmtepomp 1.0 | 5.730         |                           | 1.318               |
| Droogkoeler    | 3.136         |                           | 721                 |
| Mixer-case     | 2.542         | Mei 2021 t/m april 2022   | 585                 |
| <b>Totaal</b>  | <b>27.226</b> |                           | <b>6.263</b>        |

Tijdens bepaalde periodes werd de mixer in de gekoelde kelder vaker aangezet dan in de referentie, met name om de mestkorst die werd gevormd tussen de koelleidingen weg te krijgen (wat niet lukte, zie Paragraaf 2.5.2). Ter vergelijking, de mestmixer in de referentiekelder gebruikte met 1.610 kWh tussen mei 2021 tot en met april 2022 (\*0,23= 370 euro) circa een derde minder.

Aangezien in dit geval (case-control testopstelling) alleen de mest in één mestkelder van de stal werd gekoeld zullen bij implementatie van het systeem in de gehele melkveestal van dit bedrijf de elektriciteitskosten voor koeling met dezelfde techniek zeker stijgen. Verder gaat het hier uiteraard over een experiment van een systeem in ontwikkeling. De vraag is, wat kan worden bereikt na een proces van optimalisatie en standaardisatie qua energie-efficiëntie?<sup>11</sup>

### 2.5.1.2 Baten

Ten aanzien van de potentieel economische baten bij de implementatie van mestkoelingssystemen in de toekomst worden hier twee aspecten besproken: (a) beloning voor beperking van methaanemissies (in CO<sub>2</sub>-equivalent) en (b) de geproduceerde warmte.

(a) Momenteel is er geen overheidsinstrument voor het eventueel vergoeden van de methaan die niet (in de mest) gevormd en dus niet geëmitteerd wordt. Ook zijn er geen normen/verplichtingen voor de emissiereductie van methaan, vergelijkbaar met de Rav-lijst voor ammoniak die via een vergunningstelsel de 'licence to operate' aan veehouderijbedrijven biedt door middel van de implementatie van (met name) techniek om de ammoniakemissie te reduceren. Wel zijn er al private initiatieven die primaire bedrijven vergoeden voor het reduceren van broeikasgasemissies. Zo belooft bijvoorbeeld FrieslandCampina melkveehouders die hun voetafdruk met maatregelen verkleinen.

<sup>11</sup> Daarbij kan vanzelfsprekend een steeds groter deel worden gedekt via de lokale opwekking van energie uit hernieuwbare bronnen. Het bedrijf waar het experiment werd uitgevoerd heeft inmiddels bijvoorbeeld 1.060 zonnepanelen en twee windmolens (ongeveer 14 kW per turbine). Uiteraard moet er rekening mee worden gehouden dat die opgewekte energie een marktprijs heeft (tenzij het net vol zou zitten) en dus niet 'gratis' is. Mest koelen kan daarom pas kansrijker worden als, onder andere, de restwarmte een economische waarde kan krijgen (zie Paragraaf 2.5.1.2) beloningen en een borgingssysteem voor methaanemissiereductie ontwikkeld worden.

De coöperatie zal in 2024 voor het eerst de vergoeding uitbetalen en hiervoor de Kringloopwijzer van 2023 gebruiken.

De vergoeding wordt uitbetaald op basis van de hoogte van de voetafdruk van een kilogram melk. Deze voetafdruk wordt jaarlijks voor melkveehouders bedrijfsspecifiek vastgesteld. Bij deze beloningssystematiek maakt het dus niet uit met welke maatregelen de voetafdruk tot stand komt. Om mee te tellen in de berekening van de voetafdruk op een melkveebedrijf, dient de maatregel wel opgenomen te worden in de rekenregels van de Kringloopwijzer (emissiefactor nodig). Het systeem mest koelen is op dit moment niet als maatregel in de Kringloopwijzer opgenomen, maar als gedachte-experiment wordt hier ingeschat wat een dergelijke toeslag zou kunnen opleveren.

De premie wordt op dit moment als volgt bepaald. Bij een voetafdruk van ten hoogste 775 gram CO<sub>2</sub>-eq per kg melk wordt de maximale toeslag van 1,50 euro per 100 kg melk uitbetaald. De drempelwaarde is 1.100 gram CO<sub>2</sub>-eq per kg melk, boven deze drempelwaarde wordt geen premie gegeven. Als de drempel is bereikt en tot 775 gram CO<sub>2</sub>-eq per kg melk, levert elke extra 100 gram CO<sub>2</sub>-eq reductie per kg melk een beloning van € 0,46 per 100 kg meetmelk op (FrieslandCampina, A.J. Veenstra persoonlijke communicatie, september 2023). Met een gemiddelde van 9.000 kg meetmelk per koe, 168 melkkoeien (tijdens dit experiment) en een totaal van 1.512.000 meetmelk per jaar (informatie melkveehouder) zou dat een toeslag voor dit bedrijf van 6.955 euro opleveren. Bij de maximale toeslag (€ 1,50/100 kg melk) zou dit melkveebedrijf een vergoeding van 22.680 euro kunnen krijgen. Om de jaarlijkse elektriciteitskosten van het experiment te kunnen dekken zou een vergoeding van 0,42 euro per 100 kg meetmelk in 2021-2022 voldoende zijn geweest. Eén melkkoe produceert jaarlijks gemiddeld 37,6 kg CH<sub>4</sub> per jaar (Ruyssenaars et al., 2022). Tijdens dit experiment werd 69% methaan uit de mest gereduceerd. In dit kader zou deze reductie van rond 25,9 kg methaan op (\*28) 726,4 kg CO<sub>2</sub>-eq reductie per melkkoe per jaar neerkomen. Volgens een berekening van FrieslandCampina (\*27 per kg CO<sub>2</sub>-eq) op basis van een eventuele methaanemissiereductie (uit de mest) van 33% werd een aannemelijke reductie van 35 gram CO<sub>2</sub>-eq/kg meetmelk berekend. Dit zou betekenen een toeslag van 0,16 euro per 100 kg melk. Een reductie van de methaanemissie van 75% staat gelijk aan een beloning van 0,41 euro per 100 kg melk (FrieslandCampina, A.J. Veenstra persoonlijke communicatie, september 2023). Uiteraard zijn deze berekeningen hypothetisch en moet er daarnaast rekening worden gehouden met investerings-, elektriciteit-, onderhouds- en andere kosten. Bovendien is mest koelen op dit moment niet in de Kringloopwijzer verwerkt. Daarbij zit dit specifieke melkveebedrijf op het moment van schrijven al dicht bij de ondergrens (775 gram CO<sub>2</sub>-eq per kg melk) van FrieslandCampina qua voetafdruk waardoor dit bedrijf een kleine aanvullende vergoeding zou kunnen krijgen.

Een andere benadering van het verdienpotentieel van deze techniek kan berekend worden op basis van het 'European Union Emissions Trading System' (ETS). De ETS CO<sub>2</sub>-heffing legt een prijs vast voor de industriële emissie van een ton CO<sub>2</sub>. De tarieven worden jaarlijks verhoogd. Vanaf 2023 is de jaarlijkse verhoging volgens de Nederlandse Emissieautoriteit vastgesteld op 11,55 euro, zie Tabel 7. Tegelijkertijd is er ook een handelssysteem met actuele marktprijzen<sup>12</sup>.

**Tabel 7** Huidige tariefreeks tot en met 2030. Prijzen in euro per ton CO<sub>2</sub><sup>13</sup>.

| Jaar   | 2021  | 2022  | 2023  | 2024  | 2025  | 2026  | 2027   | 2028   | 2029   | 2030   |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Tarief | 30,48 | 41,75 | 55,94 | 67,49 | 79,04 | 90,59 | 102,14 | 113,69 | 125,24 | 136,79 |

Tabel 8 geeft een inschatting van een eventuele beloning voor de CO<sub>2</sub>-eq die bij de familie Van Tilburg in een jaar (168 melkkoeien x 726,4 kg CO<sub>2</sub>-eq/melkkoe = 122.035 kg CO<sub>2</sub>-eq). Dit wordt gedaan op basis van het ETS tarief van 2022. Let wel op, momenteel is er geen systeem die deze eventuele beloning operationaliseert. Daarnaast treden er uiteraard ook emissies op als gevolg van het mestkoelingsysteem, hetzij door de gebruikte materialen, de verwijdering ervan als het energiegebruik.

**Tabel 8** Inschatting waarde (ETS) CO<sub>2</sub>-eq reductie in experiment (jaar) t.o.v. Emissieregistratie.

|                             | ETS CO <sub>2</sub> -heffing per ton CO <sub>2</sub> -eq | kg CO <sub>2</sub> -eq reductie (69%) fam. Van Tilburg (1 jaar) | €            |
|-----------------------------|--|---|--------------|
| <b>Mest koelen 2.0 +1.0</b> | (2022) € 41,75   | 122.035   | <b>5.095</b> |

<sup>12</sup> Carbon Price Tracker | Ember (ember-climate.org) (geraadpleegd december 2023).

<sup>13</sup> Bron: Tarieven CO<sub>2</sub>-heffing | Nederlandse Emissieautoriteit (geraadpleegd oktober 2023).

---

(b) De warmte die bij het koelen van mest wordt onttrokken is in principe een bruikbare bron van energie. Met het gemeten stroomverbruik door de warmtepomp van het 2.0-systeem tijdens het experiment (15.818 kWh) en bij een ingeschatte COP ('coëfficiënt of performance' = rendement) van de warmtepomp van 4,37 (persoonlijke communicatie, leverancier) is de ingeschatte geproduceerde warmte 69.125 kWh, ofwel circa 249 gigajoule (GJ) aan warmte die aan de mest werd onttrokken. Het 1.0-systeem produceerde 26.149 kWh tijdens dit periode. Op dit specifieke bedrijf wordt een deel van deze warmte gebruikt voor de verwarming van de bedrijfswoning<sup>14</sup>. Er zijn echter nog niet of nauwelijks transportleidingen voor warmte die melkveebedrijven met warmtenetten verbinden, en de vraag is of die kosteffectief gerealiseerd zouden kunnen worden. Daarom, zou warmte uit dit systeem in de praktijk vooral nuttig gebruikt moeten worden in processen op het melkveebedrijf zelf. Opties zijn bijvoorbeeld mest of gras drogen. Kanttekeningen daarbij zijn dat bij mest drogen een voorafgaande scheidingsstap nodig is, en drogen alleen nuttig is als er een mestoverschot is dat geëxporteerd of afgezet zou moeten worden. Bij gras drogen geldt dat dit, in principe, alleen tijdens het groeiseizoen uitgevoerd wordt.

Bij dit gedachtenexperiment moet worden aangetekend dat de inschattingen van kosten en baten gebaseerd zijn op een experimentele situatie. Daarbij ontstonden er praktische problemen met het 2.0-systeem die implementatie, in deze uitvoering, in de melkveehouderij bemoeilijkt.

### 2.5.2 Implementatie in de melkveestall - praktische aspecten

Een belangrijk probleem dat zich tijdens de looptijd van dit onderzoek heeft voorgedaan was dat tussen de koelleidingen van het 2.0-systeem een korst (samenklontering van mest en strooisel in combinatie met ijsvorming) ontstond. Er werd geprobeerd om deze korst te breken en te verwijderen, door vaker te mixen. Dit is uiteindelijk niet gelukt.

Dit probleem zou op de middellange en lange termijn verergeren. De koelleidingen er jaarlijks uithalen om de korst te verwijderen is echter arbeidsintensief, ingewikkeld (denk aan roostervloer al dan niet gedeeltelijk verwijderen, buizen met korst eruit halen, schoonmaken, etc.) en daarom onwenselijk. Het laten liggen van een drijvend koelingssysteem met korst is echter ook geen optie. Conclusie was dat het systeem in deze uitvoering niet praktijkrijp was.

Er zijn andere aandachtspunten bij de implementatie van een drijvend mestkoelingssysteem. Denk bijvoorbeeld aan de complexe structuur van de mestkelders in melkveestallen – verschillende kelders en verschillende mestkanalen in/per kelder, schotten, etc. In principe zouden alle mestkelders moeten worden voorzien van voldoende koelleidingen die tegelijkertijd met de koelunit verbonden moeten zijn en zeer waarschijnlijk ook voorzien moeten worden van een mixer.

Systemen onder de roostervloer zijn doorgaans niet populair bij veehouders vanwege de lastige bereikbaarheid bij storingen en andere problemen die onderhoud/reparatie moeizaam maken. Specifiek voor dit koelingssysteem waarbij de koelleidingen in de mest liggen(/drijven) is verder het advies om biologisch afbreekbare glycol te gebruiken vanwege het milieurisico bij eventuele lekkages.

### 2.5.3 Institutionele aspecten

In navolging van de uitdagingen van klimaatverandering en nationale en internationale doelen heeft Nederland zich vastgelegd om in 2030 de broeikasgasemissies met 49% te reduceren en in 2050 met 95%. Mest koelen kan hierin een bijdrage leveren. De overheid investeert op veel fronten om innovaties tegen methaanemissie in de veehouderij aan te jagen. Onder andere via het programma Klimaatvelop – Integraal Aanpakken waarbinnen dit onderzoek is uitgevoerd. Ook via de Subsidiemodules brongerichte verduurzaming stal- en managementmaatregelen (Sbv) worden innovaties ondersteund. Bij de Sbv ligt de minimale reductie om in aanmerking te komen voor subsidie op 50% voor zowel de methaan- als de ammoniakemissie. Ammoniakemissiereductie is juridisch geborgd in de Regeling ammoniak en veehouderij

---

<sup>14</sup> Ieder jaar berekent de Autoriteit Consument & Markt (ACM) de maximale tarieven die leveranciers voor warmte in rekening mogen brengen. In 2023 was dit maximaal 90,91 euro per GJ. Let wel op dat in de wet staat dat de warmtetarieven aan de gasprijzen zijn gekoppeld. Door de instabiele wereldorde en hoge gasprijzen zijn de warmtetarieven flink gestegen en geldt er zelfs een prijsplafond voor warmte.

---

(Rav) die is gebaseerd op de Wet ammoniak en veehouderij (Wav). Hoewel deze Rav-lijst momenteel omstreden is biedt dit specifieke handvaten voor veehouderijbedrijven en technologieleveranciers. Luchtwassers worden op grote schaal in de intensieve veehouderij toegepast vanwege hun ammoniakemissiereductiepotentie, hoewel ze noch methaanemissie reduceren noch een 'verdienmodel' bieden, behalve de 'licence to operate'. Het is wel mogelijk dat binnenkort een methaanbeleid wordt geformuleerd via bijvoorbeeld een emissiereductieverplichting, CO<sub>2</sub>-rechten of beloningen à la toeslagen van FrieslandCampina (Paragraaf 2.5.3). Methaanemissie-reductie via mestkoeling zou in dergelijke systemen beloond kunnen worden als er een emissiefactor (EF) voor wordt opgenomen in (bijvoorbeeld) de Kringloopwijzer. Echter, in afwezigheid van borgingssystemen voor methaanemissie vormen alle investerings- en operationele kosten van innovaties zoals mest koelen nu een barrière voor hun verdere ontwikkeling en implementatie. Maatregelen die ook een reducerend effect op de ammoniakemissie hebben zijn daarom nu kansrijker.

## 2.6 Conclusies en reflectie

Het doel van deze studie was om via ontwerp, ontwikkeling en emissiemetingen, de technische kansen voor het koelen (< 8 °C of in ieder geval onder 10 °C) van drijfmest met het 2.0-systeem in bestaande mestkelders van melkveestallen te onderzoeken om de methaanemissie van mest te reduceren (> 50% reductie). Het uitvoeren van onderzoek onder praktijkomstandigheden is ingewikkeld. Tijdens het experiment met het 2.0-systeem stond het 1.0-systeem (bodemkoeling) aan. Dit heeft uiteraard substantiële gevolgen gehad voor de resultaten die hier worden gepresenteerd. De logische, gewenste stapsgewijze opbouw van het onderzoek en afwisseling met systeemontwikkeling van 1.0 bodemkoeling naar 2.0 drijvende koelleidingen kon zodoende niet volledig gerealiseerd worden. In theorie kan het plaatsen van koelleidingen in de bovenste laag interessanter zijn dan op de bodem van de kelder voor het koelen van opgeslagen drijfmest (zie bijvoorbeeld Wu et al., 2019). Deze verwachting/hypothese kon in dit onderzoek niet bevestigd worden.

Het onderzoek heeft wel laten zien dat het mogelijk is om de methaanemissie uit opgeslagen mest fors te reduceren door de temperatuur te verlagen. Tijdens het jaar waarin het onderzoek werd uitgevoerd werd een gemiddelde mesttemperatuur van 9,3 °C bereikt. Bij de referentiekelder werd een gemiddelde temperatuur van 13,1 °C gemeten. Het verschil tussen case en control was dus 3,8 °C. Hoewel verschillende aspecten van mestmanagement de methaanemissie beïnvloeden laat de literatuur zien dat het grootste deel van de methaanemissies uit de mest in de warmere maanden (juni-september) ontstaat en dat temperatuur een belangrijke factor is in het ontstaan van methaan (Safley & Westerman, 1994; Baldé et al., 2016; Baral et al., 2018; Im et al., 2020; Cárdenas et al., 2021; Dalby et al., 2021).

De resultaten van de emissiemetingen zijn indicatief en moeten daarom met terughoudendheid geïnterpreteerd worden. Tijdens de meetperiode werd waargenomen dat de methaanemissie uit de gekoelde opgeslagen mest gemiddeld 69% lager was dan uit de niet-gekoelde mest. Zouden we de laatste meetdag, waarbij ingrepen nodig waren om te kunnen meten, meenemen dan zou de gemiddelde reductie neerkomen op 64%.

De ammoniakemissie daalde gemiddeld met 9%, al was dit verschil niet significant. In vergelijking met het onderzoek naar alleen het 1.0-systeem (toen een stijging van gemiddeld 75% werd gemeten) is dit een aanzienlijke verbetering, maar aangetekend moet worden dat nu zowel de gekoelde als referentiekelder dagelijks gemixt werden. Onder normale omstandigheden zou de referentiekelder veel minder vaak gemixt zijn. In principe moet het volgens de literatuur mogelijk zijn om de ammoniakemissie door middel van het verlagen van de temperatuur van mest te beperken. Zo rapporteren Wu et al (2019) een modelmatig ingeschatte ammoniakemissiereductie van 37,3% met een hydraulisch systeem (dat koelde tot 10 °C). Ook in dit experiment werden dergelijke temperaturen in de gekoelde mest bereikt, maar werd er weinig tot geen reductie van ammoniak gevonden. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat in dit experiment de opgeslagen mest dagelijks werd gemixt, met misschien een negatief effect op de ammoniakemissie (Calvet et al., 2017).

---

## 3 Extern mest koelen

### 3.1 Inleiding

Op grond van de voorlopige resultaten met de eerste versies van mestkoeling (1.0 en 2.0) in de mestkelders werd geconcludeerd dat het onttrekken van warmte aan mest meer energie kost dan verwacht<sup>15</sup>, en daarom een veel grotere lengte aan leidingen in de mestput nodig zou zijn om voldoende warmte-uitwisselingscapaciteit te krijgen. Daarnaast wezen de praktijkexperimenten uit dat de mest geregeld (meermaals daags) gemixt moet worden om de temperatuur in de kelder homogeen te krijgen, wat een extra investering in elektrische mixers vereist. Verder zijn systemen die in de mestkelders onder de betonnen roostervloeren geplaatst moeten worden niet geliefd bij veehouders en monteurs omdat het lastig is om reparaties uit te voeren bij storingen of andere problemen. Tevens werd bij de tweede versie van het mestkoelingsysteem (2.0) een korst tussen de koelleidingen gevormd die het systeem minder efficiënt en op termijn onbruikbaar zou maken.

Om dit te omzeilen en het bovendien makkelijker te maken om meer koelleidingen te kunnen gebruiken is er een systeem ontworpen waarin mest extern wordt gekoeld. In dit ontwerp wordt mest uit de mestkelder naar een externe opslag gepompt waarin het wordt gekoeld, waarna de gekoelde mest terug in de kelder wordt gebracht. Dit maakt toepassing bij bestaande stallen en mestkelders makkelijker, omdat leidingen niet meer in de kelder hoeven te worden ingebracht.

De verwachting was dat met dit systeem mixen minder nodig of wellicht zelfs overbodig zou kunnen worden, omdat de mest continu wordt aangezogen aan één kant van de stal en ingebracht aan de andere kant. Het geregeld aanzuigen en inbrengen van mest kan als gewenst neveneffect hebben dat er een geleidelijke stroming optreedt door de mestkelder heen met genoeg mixend vermogen om de mest homogeen te houden, zodat de mest overal in voldoende mate is gekoeld.

In 2021 werd van dit ontwerp een eerste prototype geïnstalleerd op een melkveebedrijf in Haulerwijk. De doelstelling was om de technische kansen te onderzoeken voor externe koeling van drijfmest (via ontwerp en ontwikkeling) in bestaande mestkelders van melkveestallen om de emissie van methaan (en zo mogelijk ook ammoniak) uit mest te reduceren. Daarbij is speciaal gekeken naar de mogelijkheid om met een naar verhouding met de mestkelders veel kleinere tijdelijke externe opslag genoeg koelingscapaciteit te realiseren om de temperatuur in het volledige opgeslagen mestvolume in de kelder onder de 8 °C te krijgen en te houden.

#### 3.1.1 Ontwerptraject

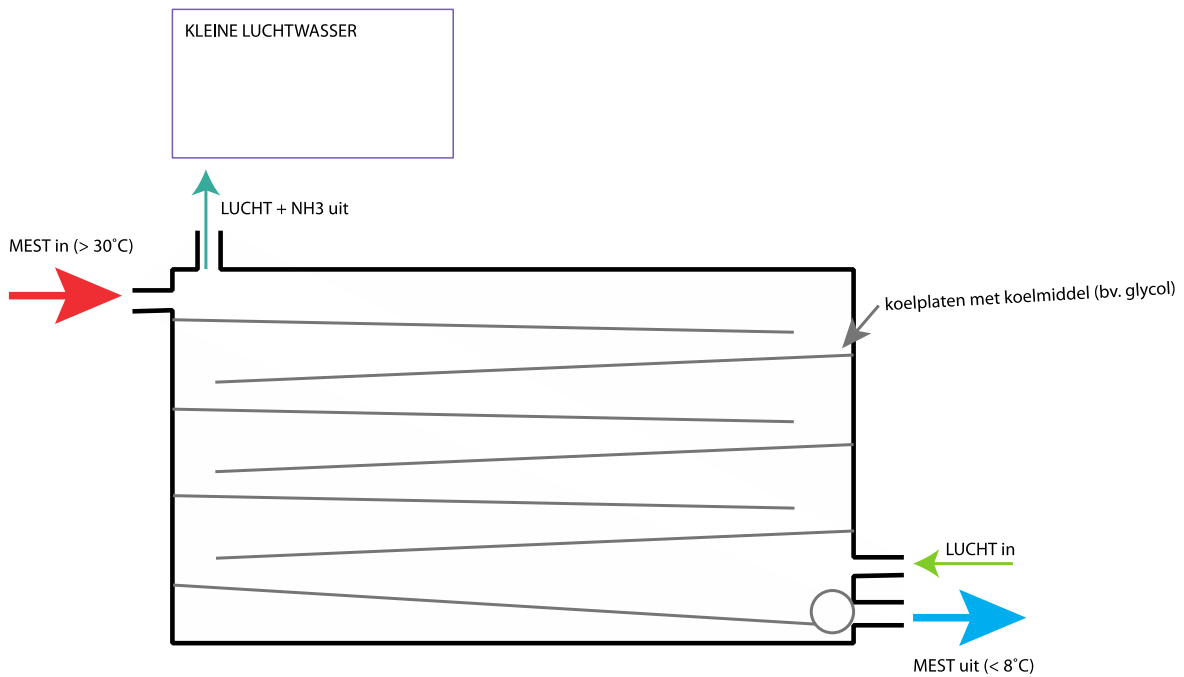
In samenwerking met de eerder (Hoofdstuk 2) genoemde partnerbedrijven heeft WLR een aantal sessies (februari-mei 2021) georganiseerd om een ontwerp voor een dergelijk extern koelsysteem te ontwikkelen.

Een eerste ontwerpconcept was een cascadekoelingsysteem (Figuur 14) met een continu proces. Warme mest wordt uit de kelders gepompt en ingebracht bovenin de ruimte en stroomt via koelplaten op afschot naar beneden. De koelplaten onttrekken warmte uit de mest. Tegelijkertijd wordt een tegenstroom van lucht gecreëerd om de mest te strippen van ammoniak. Een kleine luchtwasser aan het einde vangt de ammoniak af.

---

<sup>15</sup> Het is wel belangrijk om te melden dat dit experiment met extern koelen is begonnen toen het experiment en metingen met het Mest koelen 2.0-systeem nog liep.

Hoewel interessant vanwege de dubbele functie van het ontwerp, is vanwege de meervoudige technische uitdagingen en verwachte kosten besloten om voor een ander systeem te kiezen, dat in de volgende paragraaf beschreven wordt.



**Figuur 14** Het cascade ontwerp om mest extern te koelen (niet verder ontwikkeld in dit project).

### 3.2 Melkveebedrijf, testopstelling en systeembeschrijving

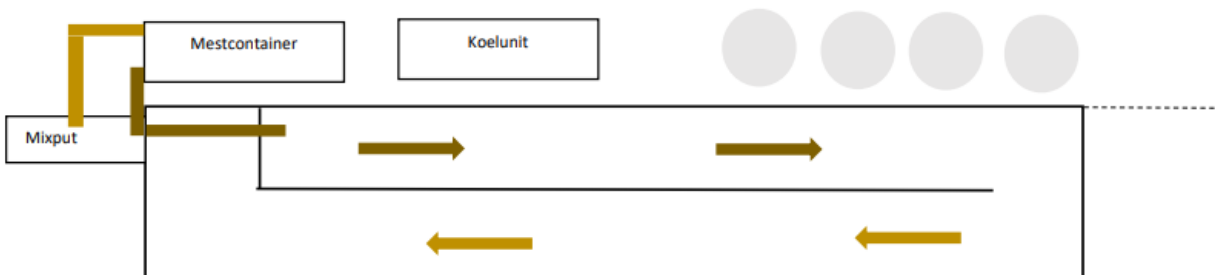
Hoewel voor de zomer van 2021 het ontwerp was vastgesteld, kon pas in december 2021 het systeem volledig worden geïnstalleerd. Dit kwam door lange levertijd van onderdelen als gevolg van de Covid-19 lockdowns.

Het systeem werd op het melkveebedrijf van de familie Boersen (Mts. E., L. en M. Boersen-Rigter) in Haulerwijk geïnstalleerd. Het betreft hier een serrestal met 3 gangen (zie Foto 2) met betonnen roostervloeren, met daarin ongeveer 65 koeien en 25 stuks jongvee. De mestkelder waarin het experiment werd uitgevoerd was 31,5 m lang, 6 m breed en 2 m diep.



**Foto 2** Serrestal. Kruis: experimenteel gedeelte.

Er werd een circulaire meststroom op gang gebracht waarbij aan één zijde van de mestkelder drijfmest actief werd aangezogen en naar een mestcontainer verpompt, zie Figuur 15. Er werden andere mogelijkheden overwogen voor het tijdelijk opslaan en koelen van batches mest.



**Figuur 15** Bovenaanzicht van meststroomschema. Mestpomp zuigt mest (in de mixput) aan en brengt dit in de mestcontainer (lichtbruine balken). De gekoelde mest (donkerbruin) loopt vanuit de mestcontainer door de zwaartekracht via een buis in de kelder achter de dichtgemaakte scheidingsmuur.



Basis ontwerpeisen hiervoor waren, dat er genoeg koelleiding kon worden aangebracht om de mest te koelen, bestendigheid tegen mest en andere meer praktische aspecten zoals snelle levering, transport, etc. Zo bleken mini-silo's onder speciaal transport te vallen en technisch moeilijk van koelleidingen te voorzien. Standaardmaten van betonnen containers zijn niet groot genoeg waardoor de kostprijs vanwege maatwerk te hoog zou oplopen.

Uiteindelijk is gekozen om met een mestcontainer te werken en deze met een zeil af te dekken om zo de ammoniakemissie te reduceren. In deze container werd de koelleiding ingebracht samen met een aan- en afvoerpunt voor de mest om de mest te kunnen verpompen van en naar de aangepaste mestcontainer. Mest wordt uit de mestkelder naar de mestcontainer gepompt met een dompelpomp. In de mestcontainer zit 450 m aan koelleiding waardoor water (75-80%) en glycol (20-25%) stroomden om de mest te koelen, zie Figuur 16.



**Figuur 16** Mest wordt met een pomp aangezogen vanuit de mestkelder (foto linksboven). De mest komt boven in de mestcontainer binnen (foto midden boven, rood omcirkeld), de leiding loopt binnen de container naar beneden door zodat de mest uiteindelijk onderin de mestcontainer wordt ingebracht (foto linksonder, rode pijl is richting van de mestleiding). Zodra het mestniveau in de mestcontainer hoog genoeg is loopt dit vanzelf terug via een andere leiding (gele pijl). Rechts, koelleidingen binnen de container.



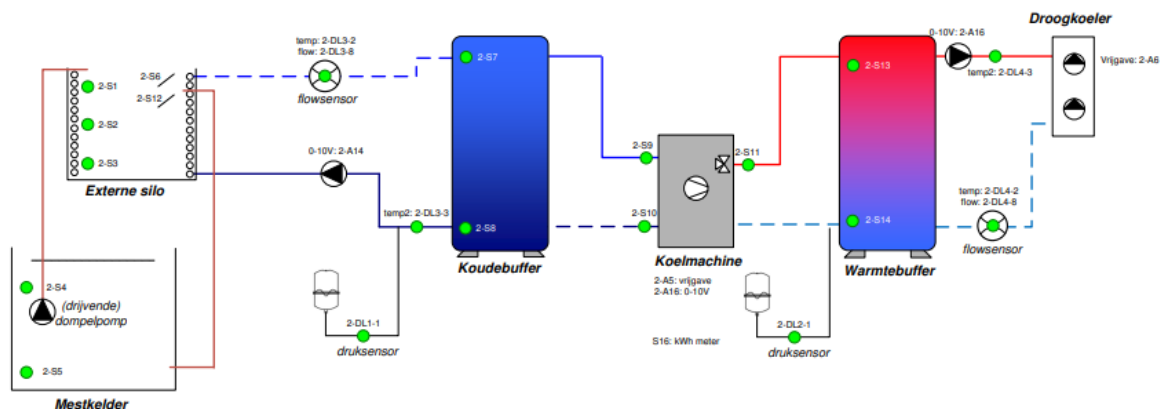
**Foto 2** leidingen tussen mestcontainer (links) en koelunit (rechts).

De gehele opstelling bestond uit twee containers. Naast de mestcontainer stond een zeecontainer (de koelunit), met daarin de warmtepomp en de andere apparaten van het systeem. Het water-glycol mengsel dat door de koelleiding liep transporteerde de onttrokken warmte naar de koelunit, zie Foto 2.

In de koelunit stond o.a. een MasterTherm warmte pomp (AQ90i MasterTherm 48kW), een circulatiepomp om het water-glycol mengsel door de leidingen te transporteren en een koude- en een warmtebuffer met een capaciteit van elk 1.000 liter. Zie Figuur 17 en Foto 3.

**Foto 3** Impressie koelunit met o.a. warmtepomp en koude- en warmtebuffers.





**Figuur 17** Schema mestkoelingsstelsel, extern mest koelen. Bron: Geothermica.

De warmte die is onttrokken aan de mest wordt door de koelvloeistof (een mengsel van water met glycol) opgenomen en deze wordt op zijn beurt weer via een water/lucht warmtewisselaar (droogkoeler) afgekoeld om vervolgens de teruggekoelde vloeistof weer naar de mestcontainer te leiden, zie Figuur 17 en Foto 4. De droogkoeler lost de gewonnen warmte naar de buitenlucht. Deze warmte werd dus nog niet nuttig gebruikt (verloren). In Hellum (zie Hoofdstuk 2) wordt de bedrijfswoning opgewarmd met de onttrokken warmte, maar ook daar is dan bij correct functioneren nog steeds een warmteoverschot. In het algemeen zal gelden dat koeling van mest bij gemiddelde of grotere bedrijven een zodanig warmte-overschot oplevert dat die niet goed meer benut kan worden in de woning of de bedrijfsgebouwen, en dus (op dit moment) actief geloosd zal moeten worden naar de omgeving. Vanzelfsprekend verbetert de businesscase van mestkoeling als die warmte ook benut kan worden voor nieuw toe te voegen bedrijfsprocessen (zoals grasdrogen e.d.).



**Foto 4** Container met koelunit en boven op de droogkoeler.

### 3.3 Temperatuurmetingen

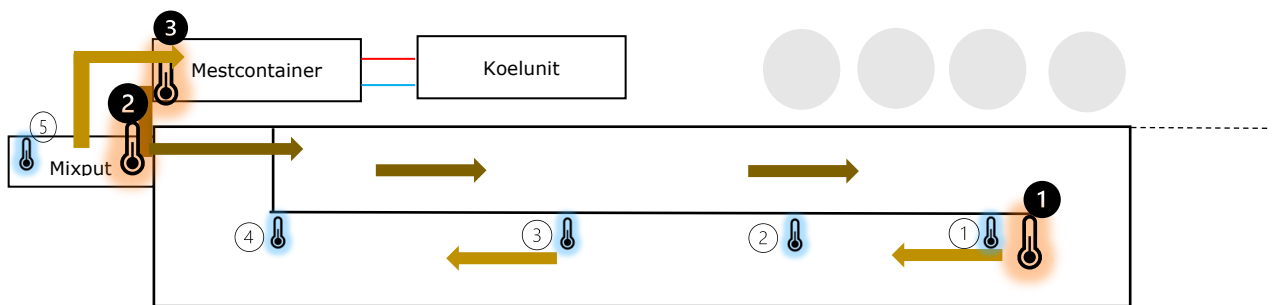
Op basis van de literatuur en opgedane ervaringen met mest koelen in de kelders (1.0 en 2.0 systemen) is in dit geval besloten om geen emissiemetingen uit te voeren bij de test met extern koelen. De focus lag op extern koelen als 'proof of concept', om te kijken of het technisch mogelijk was met dit prototype de mest in een bestaande mestkelder onder de 8 °C te brengen en te houden.

Het experiment werd uitgevoerd bij een mestkelder waarop droogstaande koeien werden gehouden. In deze kelder werd de temperatuur continu gemeten met weerstandsthermometers<sup>16</sup> op twee punten: bij de mestmixput net buiten de stal waar in dit experiment ook de mest werd uitgedompt en aan de andere kant van de mestkelder. Op elk punt werden thermometers op 10, 50 en 100 cm diepte geplaatst. Ze waren voorzien van een thermoplastisch rubber ter bescherming. Vanaf 26 april 2022 werd ook de temperatuur in de mestcontainer gemeten. Er werden ook 4 keer handmatige temperatuurmetingen uitgevoerd op 13 april, 19 april, 25 april en op 2 mei. In dat geval werd de temperatuur van de mest gemeten op 5 hoogtes in stappen van 20 cm vanaf de bodem.

<sup>16</sup> 4-WIRE AIRTIGHT PROBE IN THERMOPLASTIC RUBBER (italcoppie.it).

Dat wil zeggen, op bodemhoogte, op 20, 40, 60 en 80 cm van de bodem en dan een laatste meting net op het oppervlak van de mest. Zie Figuur 18 voor een globaal overzicht waar de meetpunten zich bevonden.

In de mestkelder verdeelde een muur in de lengterichting onder de ligboxen de kelder in twee delen, behalve aan de kopse kanten (Figuur 18). Deze verdeling zorgt voor circulatie van de mest bij het mixen. Daarnaast was er nog een extra muur haaks op de muur in het midden, met een opening van ongeveer 1m<sup>2</sup>. Deze opening werd afgetimmerd om directe aanzuiging van de zojuist gekoelde mest te voorkomen. Bij het aftimmeren werd de leiding die de koude mest inbrengt door de plaat geleid. Oogmerk hiervan was om een plug-flow in de mestkelder te genereren. De testronde begon op 13 april 2022 met het meten van de temperatuur van de mest in de mestkelder. Het mestkoelingssysteem ging vervolgens aan op 20 april 2022 en werd uitgezet op 3 mei 2022.

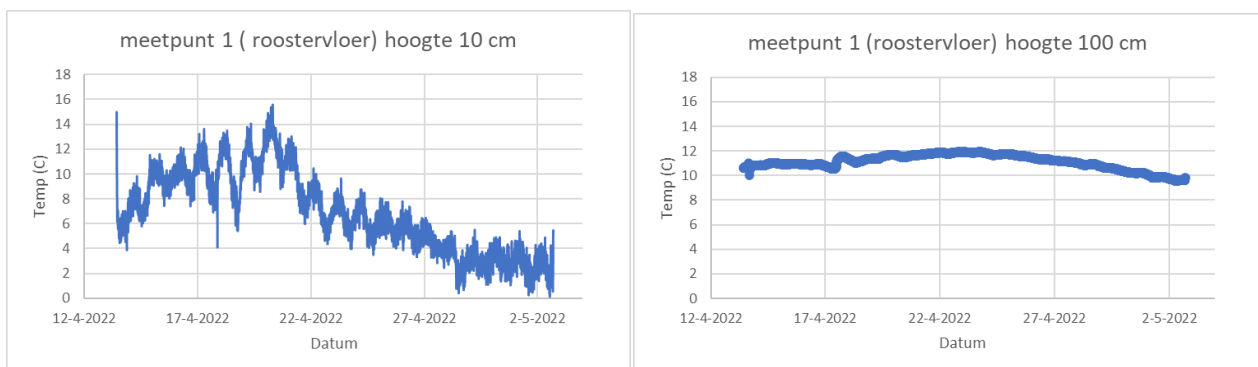


**Figuur 18** Schema extern mest koelen met 3 vaste meetpunten voor continu metingen van de temperatuur (grote iconen in oranje-gloed), meetpunt-rechts 1, links 2, mestcontainer 3. De 5 meetpunten waar handmetingen werden uitgevoerd (blauw-gloed).

## 3.4 Resultaten

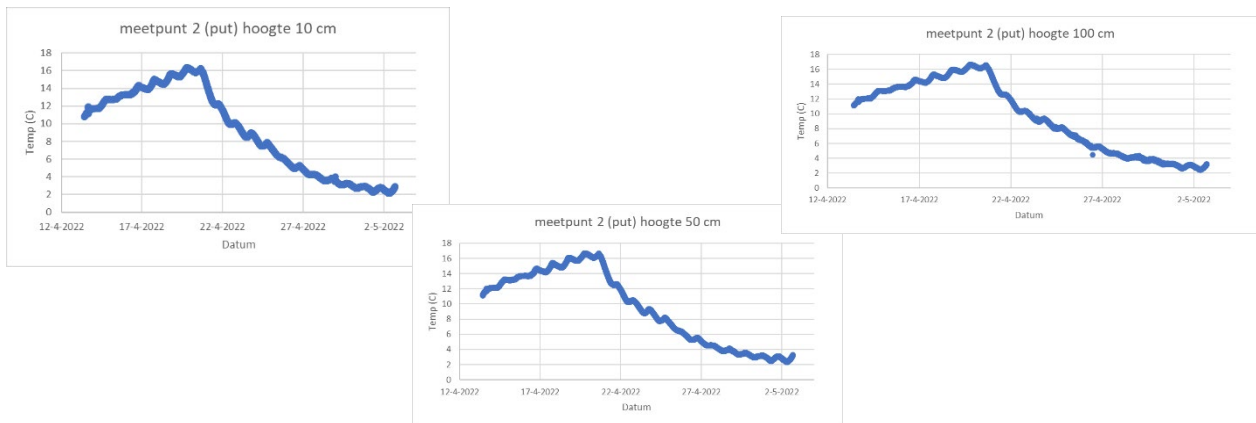
### 3.4.1 Continue temperatuurmetingen

Figuur 19 geeft de ontwikkelingen van de temperaturen van de mest op vast meetpunt 1 (zie Figuur 18 voor de positie van de meetpunten) op 10 en 100 cm diepte. De meetdata van meetpunt 1 op 50 cm diepte bleken niet correct te worden vastgelegd en zijn niet weergegeven in dit rapport. Uit deze figuur blijkt dat de gekoelde mest zich niet gelijk verdeelt over het volume in de mestkelder. Op verschillende dieptes op dezelfde positie in de stal zijn zeer grote temperatuurverschillen waargenomen. Bij meetpunt 1 op 10 cm van de bodem van de mestkelder daalde de gemiddelde temperatuur sterk naarmate er langer gekoeld werd tot rond de 3 graden (zie Tabel 12). Echter op een hoogte van 100 cm van de bodem op hetzelfde meetpunt in de stal was nauwelijks een koelingseffect waarneembaar (zie Tabel 12 en Figuur 19).



**Figuur 19** Temperatuurontwikkeling (voor en tijdens het koelen) op meetpunt 1 op 10 (links) en 100 cm (rechts) hoogte van de bodem.

Bij vast meetpunt 2 (Figuur 20 en Tabel 9) is wel over de gehele hoogte van het meetpunt een daling in temperatuur waargenomen. Dit meetpunt was vlak naast het aanzuigpunt voor de koelingsinstallatie wat betekent dat hier meer menging plaatsvond dan aan de andere kant van de mestkelder zoals bij meetpunt 1.

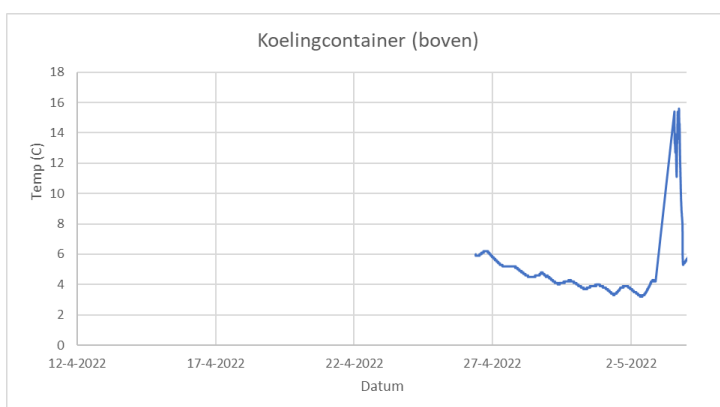


**Figuur 20** Temperatuurontwikkeling van de mest op 10 (linksboven), 50 (rechtsboven) en 100 cm (onder) hoogte vanaf de bodem op meetpunt 2 voor en tijdens het koelen.

**Tabel 9** Gemiddelde temperaturen op verschillende meetpunten en verschillende hoogtes vanaf de bodem van de mestkelder gedurende de drie volledige weken van het experiment.

|                                 | Meetpunt 1<br>10cm | Meetpunt 1 100<br>cm | Meetpunt 2 10<br>cm | Meetpunt 2 50<br>cm | Meetpunt 2 100<br>cm |
|---------------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 13 april 10:20 - 20 april 10:20 | 9,7                | 11,1                 | 13,9                | 14,3                | 14,2                 |
| 20 april 10:20 - 27 april 10:20 | 7,0                | 11,6                 | 8,8                 | 9,1                 | 9,3                  |
| 27 april 10:20 - 02 mei 16:40   | 3,0                | 10,4                 | 3,1                 | 3,4                 | 3,5                  |

De temperatuurdaling in beide meetpunten kwam overeen met de gemeten temperatuurontwikkeling in de mestcontainer (Figuur 21) vlak voordat de net gekoelde mest weer terugstroomde in de mestkelder.



**Figuur 21** Temperatuurontwikkeling in de mestcontainer (Erwin de Boer persoonlijke communicatie).

Om de prestaties van het systeem te kunnen begrijpen werd er besloten om ook in de mestcontainer de temperatuur te meten. De temperatuur werd gemeten in de container op de hoogte waarop de mest weer uitstroomt. De mesttemperatuur zakte op dit punt tot bijna 3 °C (Figuur 21). Om, uiteraard, weer na afloop van het experiment terug op te lopen tot de omgevingstemperatuur.

### 3.4.2 Handmatige temperatuurprofielen

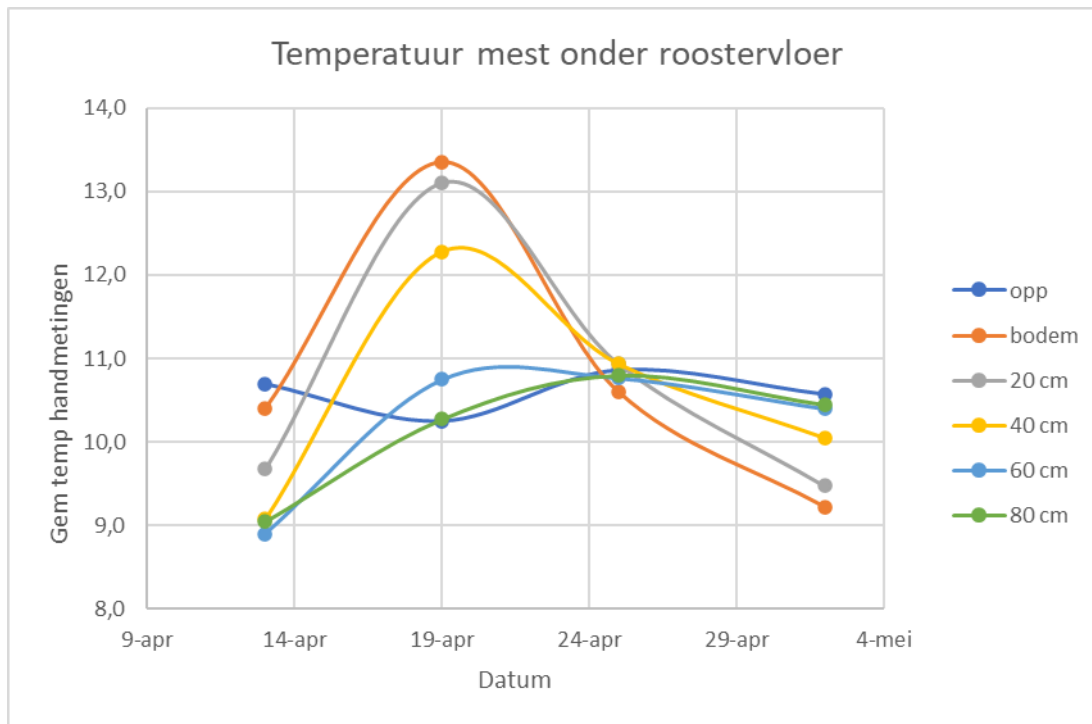
Tabel 10 geeft de handmatig gemeten temperaturen die waargenomen zijn op de meetpunten op verschillende hoogtes in de mestkolom.

**Tabel 10** *Temperatuurprofielen (°C) uit de 4 handmatige metingen op 5 meetpunten in de stal en op verschillende hoogten vanaf de bodem van de mestkelder. Nota bene: in de mixput werden ook continue metingen uitgevoerd. Op 25 april bevond zich een stier op meetpunt 4 en daarom werden daar die dag geen metingen uitgevoerd.*

| <b>13-apr</b> | <b>Meetpunt 1</b> | <b>Meetpunt 2</b> | <b>Meetpunt 3</b> | <b>Meetpunt 4</b>     | <b>Mixput</b>  |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|----------------|
| Oppervlak     | 11,3              | 10,3              | 11,4              | 9,8                   | 9,4            |
| 80 cm         | 9,4               | 9                 | 9,2               | 8,6                   | 9,2            |
| 60 cm         | 9,3               | 8,9               | 8,8               | 8,6                   | 10,8           |
| 40 cm         | 9,4               | 9,1               | 9                 | 8,8                   | 11,2           |
| 20 cm         | 9,6               | 9,5               | 9,5               | 10,1                  | 11,3           |
| Bodem         | 10                | 10,2              | 10,8              | 10,6                  | 11,3           |
| <b>19-apr</b> | <b>Meetpunt 1</b> | <b>Meetpunt 2</b> | <b>Meetpunt 3</b> | <b>Meetpunt 4</b>     | <b>Mixput</b>  |
| Oppervlak     | 10,2              | 10,4              | 10,1              | 10,3                  | 15,8           |
| 80 cm         | 10,1              | 10,2              | 9,8               | 11                    | 10,8           |
| 60 cm         | 10,3              | 10,6              | 10                | 12,1                  | 10,3           |
| 40 cm         | 10,5              | 11,9              | 10,8              | 15,9                  | 15,7           |
| 20 cm         | 11,6              | 12,9              | 12,4              | 15,5                  | 15,7           |
| Bodem         | 12                | 13,4              | 13,8              | 14,2                  | 15,7           |
| <b>25-apr</b> | <b>Meetpunt 1</b> | <b>Meetpunt 2</b> | <b>Meetpunt 3</b> | <b>Meetpunt 4</b>     | <b>Mixput</b>  |
| Oppervlak     | 11                | 10,3              | 11,3              | (Stier)               | 10,9           |
| 80 cm         | 10,7              | 10,8              | 10,9              |                       | 11,1           |
| 60 cm         | 10,7              | 10,8              | 10,8              |                       | 11,3           |
| 40 cm         | 10,9              | 11                | 10,9              |                       | 11,1           |
| 20 cm         | 10,9              | 11                | 10,9              |                       | 10,9           |
| Bodem         | 9,8               | 11                | 11                |                       | 10             |
| <b>2-mei</b>  | <b>Meetpunt 1</b> | <b>Meetpunt 2</b> | <b>Meetpunt 3</b> | <b>Krachtvoer-box</b> | <b>Mixput*</b> |
| Oppervlak     | 11,2              | 10                | 10                | 11,1                  |                |
| 100 cm        | 10,5              | 10,1              | 9,8               | 10,7                  |                |
| 80 cm         | 10,5              | 10,4              | 10,1              | 10,8                  |                |
| 60 cm         | 10,4              | 10,4              | 10,1              | 10,7                  |                |
| 40 cm         | 10                | 10,3              | 9,6               | 10,3                  |                |
| 20 cm         | 9,1               | 10,2              | 8,9               | 9,7                   |                |
| Bodem         | 8,6               | 10                | 8,9               | 9,4                   |                |

\*4 °C Laagst gemeten temperatuur.

Uit de handmatige metingen die gedaan zijn onder de roostervloer blijkt dat de temperatuur ongeveer 2 °C daalt in de onderste lagen ten opzichte van de bovenste lagen van de mestkolom (zie ook Figuur 22), maar dat er geen goede menging plaats vindt over de gehele mestkelder. De gemiddelde temperatuur van de dieperliggende mest (bodem tot 40 cm hoog) neemt af over de tijd maar blijft tussen de 9 en 11 graden. In de bovenste laag (60 cm vanaf bodem tot oppervlakte) was er geen daling in de temperatuur waarneembaar. Figuur 22 is een weergave van de gemiddelde temperaturen van alle meetpunten per meetdag.



**Figuur 22** De gemiddelde temperatuur van de mest op verschillende hoogtes vanaf de bodem. Het gemiddelde is genomen van de 5 handmatige meetpunten op gelijke hoogtes.

### 3.4.3 Andere resultaten en inzichten

Het verschil tussen de continue en handmatige metingen wijst er op dat de mest onvoldoende gemengd werd om een homogene temperatuur te bereiken. Menging is in dit systeem afhankelijk van het aanzuigen van warme mest aan één kant van de mestkelder en inbrengen van koude mest aan de andere kant van de mestkelder. Er ontstond ergens onder in de mest een voorkeursstroom tussen het aanzuigpunt en het inbrengpunt. Deze voorkeursstroom lijkt langs de bodem van meetpunt 1 te lopen, waar wel de temperatuurdaling wordt waargenomen. Dus een kleiner volume aan (mogelijk dunnere) mest stroomde binnen de mestmassa en werd steeds kouder.

Deze inzichten komen ook overeen met observaties tijdens de metingen. De mest in de mestkelder was al enige weken niet gemixt bij aanvang van de proefperiode. Daarnaast leek de mest in deze mestkelder een vrij dikke consistentie te hebben in vergelijking met gemiddelde drijfmest, wat passieve menging van de gehele mestkelder verhindert. De dikkere consistentie is waarschijnlijk het gevolg van de koeien die zich in dit gedeelte van de stal bevonden: droogstaande koeien hebben een iets dikkere mest dan melkkoeien. Aan het einde van het experiment moest er zelfs dunnere mest ingebracht worden om de mestkelder te kunnen mixen voorafgaand aan het uitrijden.

Verder bleek op deze locatie uiteindelijk niet voldoende elektrisch aansluitvermogen te zijn om het experiment voort te kunnen zetten. De netbeheerder was niet in staat op korte termijn de gewenste verzwaren van de aansluiting van 3\*50 naar 3\*80 Ampère te realiseren. Daardoor was het voor het uitvoeren van het experiment nodig een diesellaggregaat (100 kVA) te benutten. Gedurende de tijd van het experiment gebruikte dat aggregaat al 5.377 liter diesel, met onwenselijke gevolgen ten aanzien van CO<sub>2</sub>-uitstoot en kosten.

---

## 3.5 Conclusies en reflectie

In het experiment met het externe koelingssysteem bereikte de mest in de mestcontainer een temperatuur onder de 4 °C. Ook bij de mixput waar de mest werd uitgedompt werden zulke lage temperaturen waargenomen. Echter, vanwege de relatieve stroperigheid/vastheid van de mest in de kelders ontstond zeer waarschijnlijk een deelstroom met koele en waarschijnlijk ook wat dunnere mest die via de bodem van de kelder en de mestcontainer circuleerde en steeds verder afkoelde, terwijl de temperatuur in de rest van de mest in de kelder vrijwel niet daalde. Daarmee werd slechts een klein gedeelte van het volume gekoeld.

De opstelling van extern koelen zelf geeft derhalve niet genoeg menging om volledig zonder extra mixen te kunnen werken. De consistentie, vastheid en het percentage droge stof kunnen daarnaast van invloed zijn geweest op de koude/warmteoverdracht. Dit experiment werd uitgevoerd in het gedeelte waar alleen droogstaande koeien werden gehuisvest. De mest was bovendien in de periode daarvoor niet gemixt, hetgeen er mogelijk toe heeft geleid dat de mestkolom (vastheid) niet homogeen was.

Mest koelen kost energie. En in dit geval was het zelfs nodig om diesel te gebruiken voor een aggregaat om het koelproces in gang te houden, omdat een verzwaring van de elektriciteitsaansluiting niet op korte termijn kon worden gerealiseerd. Dit is een breed voorkomend probleem in Nederland, zeker in het landelijk gebied. Mocht mest koelen de weg vinden naar de veehouderij, dan is het dus niet alleen van belang dat de hoeveelheid gereduceerde methaan in CO<sub>2</sub>-eq opweegt tegen de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de gebruikte kWh elektriciteit. Maar ook dat het elektriciteitsnet in het gebied van de toepassende bedrijven een zwaardere aansluitcapaciteit mogelijk maakt. In dit geval begon het aanvragen bij de netbeheerder om verzwaring van de aansluiting naar 3\*63 of 3\*80 in het najaar van 2021, waarop in juni 2023 werd meegedeeld dat deze verzwaring pas in september 2032 (!) zou kunnen worden uitgevoerd.

Het prototype voor extern koelen is makkelijk inpasbaar in bestaande stallen. Er is maar een beperkte ruimte nodig op het erf voor containers (mestcontainer en een zeecontainer voor de koelunit). Daarmee kan de mest uit verschillende kelders worden overgedompt in de mestcontainer. Verschillende leidingen en mestpompen kunnen hiervoor zorgen. Onder veestallen zijn meestal verschillende mestkelders en gangen. Door extern de mest te koelen zou, in principe, relatief makkelijk alle mest uit een bedrijf gekoeld kunnen worden. In ieder geval makkelijker dan met de 1.0 en 2.0 systemen, maar extra mixen blijft nodig.

## 4 Conclusies en discussie



Hier worden puntsgewijs een aantal conclusies getrokken en geleerde lessen en aandachtspunten opgesomd op basis van de experimenten met Mest koelen 2.0 + 1.0 (Hoofdstuk 2) en extern koelen (Hoofdstuk 3). Deze zijn relevant voor het implementeren van mestkoeling als milieutechnologie in de praktijk.

- Op basis van de opgedane ervaring met de mestkoelingssystemen in de mestkelder (Hoofdstuk 2) van melkveebedrijven, 1.0 bodemkoeling (Puente-Rodríguez et al., 2023) en 2.0 drijvende koelleidingen, is het aannemelijk dat een doorontwikkeld mestkoelingsysteem de temperatuur van de mest tot lagere waarden kan koelen dan in deze experimenten. Hiermee kan naar verwachting ook een hogere methaanemissiereductie uit de mest dan 69% (met het 2.0 in combinatie met 1.0-systeem) op een melkveebedrijf met een mestkelder en traditionele roostervloer worden bereikt. In Hellum werd in een vervolgstudie een meetreeks aan het extern koelingsysteem uitgevoerd. Op basis van de voorlopige resultaten werd een methaanemissiereductie uit de mest tussen 70 en 96% tussen case en control bereikt. Deze resultaten worden in 2024 gepubliceerd. Als we uitgaan van gemiddeld 37,6 kg CH<sub>4</sub> emissie uit mest per melkkoe per jaar (Emissieregistratie), dan betekent een gemiddelde methaanemissiereductie van 69% een reductie van rond 25,9 kg CH<sub>4</sub>/mk/jr, oftewel (\*28) 726,4 kg CO<sub>2</sub>-eq per melkkoe per jaar. Tijdens het jaar van het experiment waren er 168 melkkoeien in dit bedrijf. Een grove inschatting is dan dat er circa 122.035 kg CO<sub>2</sub>-eq in een jaar gereduceerd kan worden.
- Theoretisch is het ook mogelijk om de ammoniakemissie uit mest te reduceren door het verlagen van de temperatuur (zie Paragraaf 1.2).



- In de praktijk van deze experimenten werd echter geen ammoniakemissiereductie gemeten. Ons vermoeden is dat dit veroorzaakt is door het (dagelijkse) mixregime dat nodig was om de mest homogeen gekoeld te krijgen.
- Het 2.0-systeem (drijvende koelleidingen) is in theorie interessanter dan het 1.0-systeem (koelleidingen op/in de kelderbodem). In het experiment met Mest koelen 2.0 (Hoofdstuk 2) vormde zich evenwel een mestkorst tussen de koelleidingen die de bedrijfsvoering in het melkveebedrijf en het verder ontwikkelen van het systeem binnen het project in de praktijk onmogelijk maakte.
- Er wordt ingeschat dat in de melkveehouderij rond 25% van de geproduceerde methaan op het melkveebedrijf uit de mest komt. Op korte termijn kan mest koelen bijdragen aan het bereiken van de klimaatdoelen voor 2030. Echter, op de lange termijn is het beperken van de methaanemissie uit mest niet voldoende en zal ook de enterische methanogenese naar beneden moeten worden gebracht.
- Er wordt ingeschat dat in de melkveehouderij de bijdrage van de kelder aan de emissie van ammoniak 25 – 40% van de totale stalemissie is. Mocht een doorontwikkeld mestkoelingssysteem in staat zijn om de kelderemissie van ammoniak te reduceren is dit op zichzelf nog niet voldoende voor de huidige opgaven ten aanzien van de Nederlandse natuur. In de vervolgstudies rondom mest koelen zit ontwerpwerk gericht op het bedenken van combinaties van maatregelen die het mest koelen systeem ook ammoniakreducerend kunnen maken. Deze ideeën worden in 2024 gepubliceerd.
- Systemen onder de roosters worden in de praktijk vaak als onwenselijk ervaren. Op basis van de opgedane ervaring in dit project met 1.0, 2.0 en extern koelen lijken systemen waar de mest buiten de kelder gekoeld wordt in dat licht het meest gewenst. Een extern mestkoelingssysteem is op een melkveebedrijf beter/makkelijker inpasbaar dan een systeem om mest in de mestkelder te koelen. Waarbij de energievraag en dus de kosten kunnen toenemen, vanwege de benodigde energie voor de verpompings van de mest.
- Mest koelen kost energie. Een reductie van 69% methaanemissie (case-kelder, circa 84 koeien) door middel van circa 27 MWh (1.0 + 2.0) is echter op zich klimaat-technisch interessant/verdedigbaar. De CO<sub>2</sub>-uitstoot van de gebruikte energie weegt op tegen de vermeden hoeveelheid methaanuitstoot. Systemen zoals mestkoeling stellen wel eisen aan de capaciteit van de netaansluiting van het melkveebedrijf. Verzwaring van de elektriciteitsaansluiting zal aan de orde zijn bij veel melkveebedrijven en zal niet op korte termijn kunnen worden gerealiseerd. Bijvoorbeeld in het melkveebedrijf waarin het extern mest koelen systeem werd getest (Hoofdstuk 3) en volgens de laatste informatie van de netbeheerder zal dit pas in september 2032 (de aanvraag begon eind 2021) kunnen. Dit is een breed voorkomend probleem in Nederland, zeker in het landelijk gebied. Mocht mest koelen de weg vinden naar de veehouderij, dan is het dus niet alleen van belang dat de hoeveelheid gereduceerde methaan in CO<sub>2</sub>-eq opweegt tegen de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de gebruikte kWh/elektriciteit, maar ook dat het elektriciteitsnet in het gebied van de bedrijven die het toe willen passen de benodigde aansluitcapaciteit mogelijk maakt.
- Rundveedrijfmest heeft een drogestofgehalte (DS) van gemiddeld 8%, maar dit kan variëren. Een DS van 13-19% kan al als halfvast beschouwd worden (Wu et al., 2019). Mest met 20% of meer DS vertoont de kenmerken van een vaste stof. Het koelproces kan zeer verschillende effecten op vloeibare/drijfmest en vaste mest hebben (Wu et al., 2019). Het is cruciaal om het warmteoverdrachtsmechanisme in drijfmest en vaste mest te begrijpen om de koefficiëntie te verbeteren. Het mechanisme van warmteoverdracht wordt echter nauwelijks onderzocht. Door de geringe thermische geleidbaarheid daalt de oppervlaktetemperatuur van vaste/dikkere mest zeer langzaam. Het effect van koeling (met leidingen) op meer vloeibare mest vindt volgens Wu et al. (2019) sneller plaats en is in dat geval ook makkelijker in staat om de mestmassa (als er voldoende koelleidingen zijn) als geheel te koelen. Echter wordt er (ibid.) aangenomen dat de viscositeit van mest dezelfde is als die van water.

- 
- Bovendien negeren deze onderzoekers de thermische contactweerstand tussen leidingen en de mest en nemen ze aan dat de mest een homogene substantie is. Onder deze aannames is de warmteoverdracht in wezen tweedimensionaal. Praktijkonderzoek zoals hier gerapporteerd laat zien dat deze aannames onjuist zijn en dat het mechanisme van warmteoverdracht onder praktijkomstandigheden complexer is en beter moet worden onderzocht.
  - In de afwezigheid van overheidsnormen of beloningen voor de reductie van methaan ligt het niet voor de hand dat het bedrijfsleven gaat investeren in (de verbetering van) mestkoelingssystemen zoals hier besproken en dat melkveehouders deze gaan installeren op hun bedrijven. Toeslagen en beloningen zoals deze momenteel in de zuivelsector worden ontwikkeld en geïmplementeerd zijn positieve prikkels om de voetafdruk van de melkveehouderij te verkleinen.

---

# Dankwoord

Graag willen we de volgende instanties en personen bedanken voor het helpen met de uitvoering van dit onderzoek.

Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit.

Jan Pieter en Margaretha van Tilburg (Zandhoeve Holsteins)

Leendert Boersen (Mts. E., L. en M. Boersen-Rigter)

Jeroen van der Meijden (Geothermica), Rob Jacobs (L'orèl Consultancy) en Erwin de Boer.

Auke Jan Veenstra (FrieslandCampina).

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

---

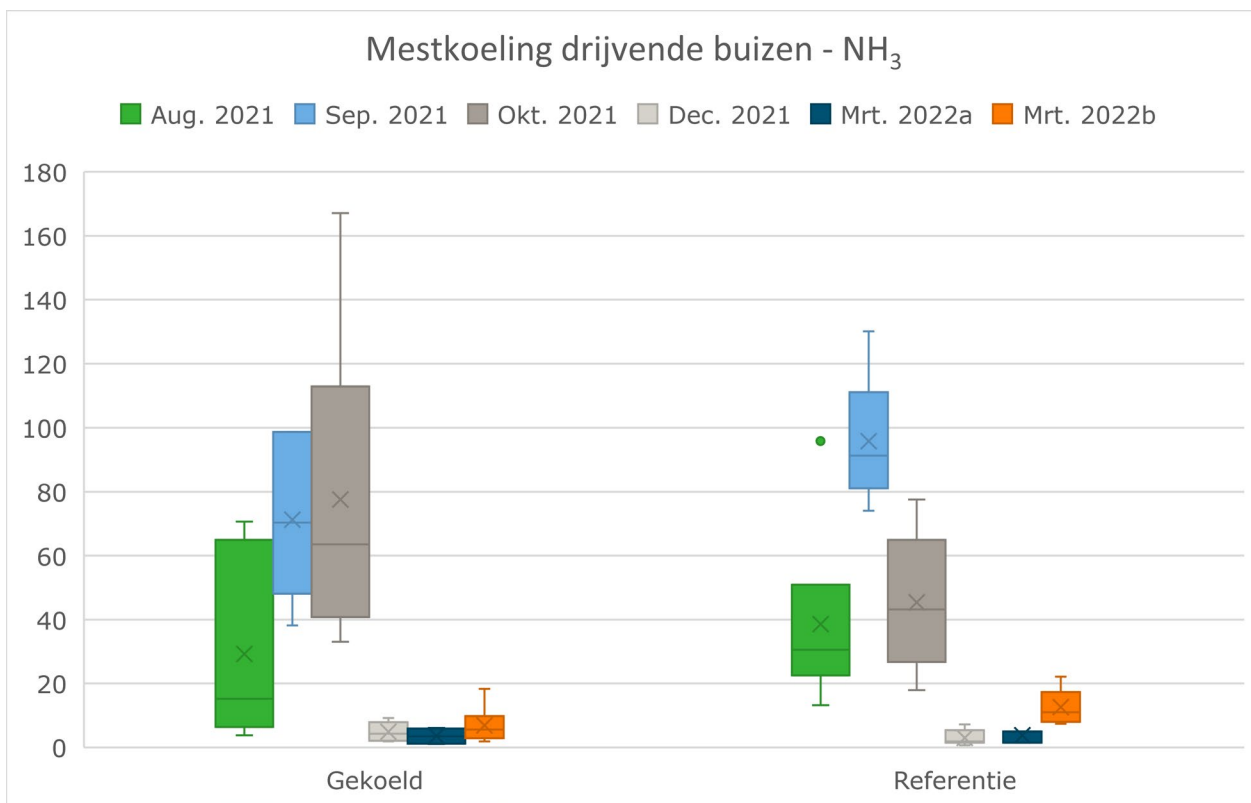
# Literatuur

- Aarnink, A.J.A., Booijen, M., Huis in 't Veld, J.W.H., Benus, A.M., Hoste, R., Vermeij, I. & Vermeer, H.M. (2022). *Opties voor ammoniakreductie in stallen voor biologische varkens*. Wageningen Livestock Research, Rapport 1387. doi:10.18174/576326.
- Aarnink, A.J.A., Demeyer, P., & Rong, L. (2023). A Simple Model as Design Tool for Low-Ammonia Emission Pig Housing. In T. Bartzanas (Ed.), *Technology for Environmentally Friendly Livestock Production* (pp. 11-21): Springer. doi:10.1007/978-3-031-19730-7\_2.
- 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.
- Aarnink, A.J.A., Van den Berg, A.J., Keen, A., Hoeksma, P., & Verstegen, M.W.A. (1996). Effect of slatted floor area on ammonia emission and on the excretory and lying behaviour of growing pigs. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 64(4), 299-310. doi:10.1006/jaer.1996.0071.
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Amon, T. & Zechmeister-Boltenstern, S. (2006a). 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. (2006b). 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, 26-35. doi:10.1016/j.agsy.2018.07.009.
- 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.
- Chadwick, D., Sommer, S., Thorman, R., Fanguero, D., Cardenas, 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. & Somer, 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.
- 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.
- 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.
- Groenestein, K., Melse, R., Mosquera, J. & Timmermans, M. (2020). *Effect mestvergistig op de emissies van broeikasgassen uit mest van melkvee: een literatuur- en scenariostudie*. Wageningen Livestock Research, WLR 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., Schroder, 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. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70(1), 79-95. doi:10.1006/jaer.1998.0275.

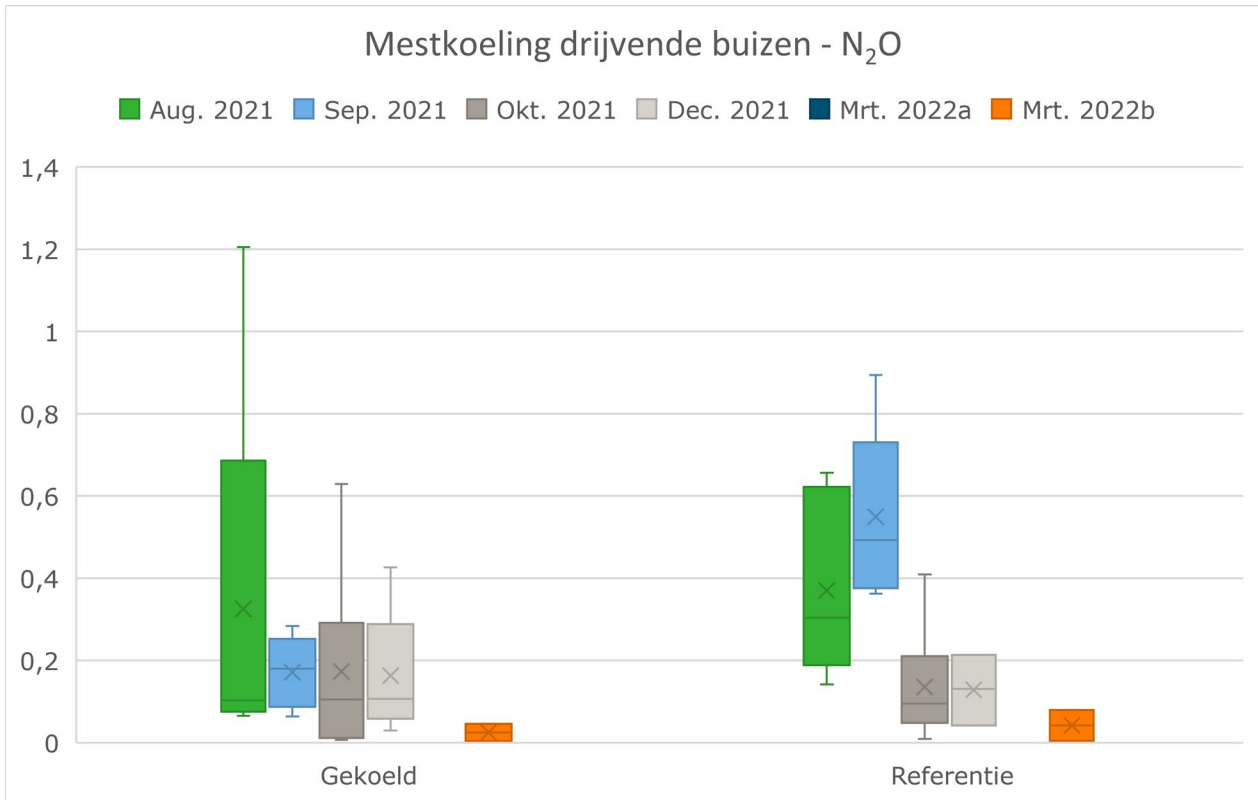
- Gustafsson, G., Jeppsson, K., Hultgren, J. & Sanno, J.-O. (2005). Techniques to Reduce the Ammonia Emission from a Cowshed with Tied Dairy Cattle. *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal*. Manuscript BC 04 010. Vol. VII. November, 2005.
- Habtewold, J., Gordon, R., Sokolov, V., VanderZaag, A., Wagner-Riddle, C. & Dunfield, K. (2018). Targeting bacteria and methanogens to understand the role of residual slurry as an inoculant in stored liquid dairy manure. *Applied and Environmental Microbiology*, 84(7), 1–15. doi:10.1128/AEM.02830-17.
- 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*, 101. doi:10.1016/j.wasman.2019.09.036.
- Jabłonski, S., Rodowicz, P., & Łukaszewicz, M. (2015). Methanogenic archaea database containing physiological and biochemical characteristics. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 65(4), 1360–1368. doi:10.1099/ijs.0.000065.
- 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.
- 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.
- Monteny, G.J. & Erisman, J.W. (1998). Ammonia emission from dairy cow buildings: A review of measurement techniques, influencing factors and possibilities for reduction. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 46, 225-247.
- Mosquera, J., Aarnink, A.J.A., Ellen, H., Van Dooren, H.J.C., Van Emous, R.A., van Harn, J. & Ogink, N.W.M. (2017). *Overzicht van maatregelen om de ammoniakemissie uit de veehouderij te beperken. Geactualiseerde versie 2017*. Wageningen, Wageningen Livestock Research, Livestock Research Rapport 645. doi:10.18174/427311.
- McVoy, 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.
- Ogink, N.W.M., Groenestein, C.M. & Mosquera, J. (2014). *Actualisering ammoniakemissiefactoren rundvee: advies voor aanpassing in de Regeling ammoniak en veehouderij*. Wageningen UR Livestock Research, Rapport 744.
- PBL (2023), *Geraamde ontwikkelingen in nationale emissies van luchtverontreinigende stoffen 2023. Rapportage bij de Klimaat- en Energieverkenning 2022*. Den Haag. Planbureau voor de Leefomgeving. PBL-publicatienummer 4930. [Geraamde ontwikkelingen in nationale emissies van luchtverontreinigende stoffen 2022 \(pbl.nl\)](https://www.pbl.nl/publicaties/geraamde-ontwikkelingen-in-nationale-emissies-van-luchtverontreinigende-stoffen-2022).
- Poteko, J., Zähner, M. & Schrade, S. (2019). Effects of housing system, floor type and temperature on ammonia and methane emissions from dairy farming: A meta-analysis. *Biosystems Engineering*, 182, 16-28. doi:10.1016/j.biosystemseng.2019.03.012.
- Puente-Rodríguez, D., Bos, A.P. & Vonk, J. (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. doi:10.18174/629797.
- Rommelink, G., Van Middelkoop, J., Ouweltjes, W. & Wemmenhove, H. (2020/21). *Handboek melkveehouderij 2020/21*. Wageningen Livestock Research. Handboek 44. doi: 10.18174/529557.
- 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.
- Snoek, D.J.W. (2016). *Refining a model-based assessment strategy to estimate the ammonia emission from floors in dairy cow houses*. (PhD). Wageningen University & Research, Wageningen. doi:10.18174/387486.
- Sokolov, V., VanderZaag, A., Habtewold, J., Dunfield, K., Wagner-Riddle, C., Venkiteswaran, J. & Gordon, R. (2019). Greenhouse gas emissions from gradually-filled liquid dairy manure storages with different

- 
- levels of inoculant. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 115(3), 455–467. doi:10.1007/s10705-019-10023-2.
- Sokolov, V.K., VanderZaag, A., Habewold, J., Dunfield, K., Wagner-Riddle, C., Venkiteswaran, J.J., Crolla, A., Gordon, R. (2020). Dairy manure acidification reduces CH<sub>4</sub> emissions over short and long-term. *Environmental Technology*, 42(18). doi:10.1080/09593330.2020.1714744.
- 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.
- Van Boxmeer, E.G.G., Schilder, H., Verdoes, N., Galama, P.J. & Kupers, G.C.C. (2023). *Samenstelling mestproducten uit innovatieve stalsystemen in de melkvee-, varkens- en kalverhouderij; Betere stal, betere mest, betere oogst* (Rapport 1410). Wageningen Livestock Research, Rapport 1410. doi:10.18174/588047.
- 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*, 89(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. doi:10.18174/478047.
- 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). Wageningen University, Retrieved from: <https://edepot.wur.nl/202851>.
- Zeeman, G. (1994). Methane production/emission in storage's for animal manure. *Fertilizer Research*, 37, 207-211.

## Bijlage – boxplot NH<sub>3</sub> en N<sub>2</sub>O



**Figuur 23** Boxplot van metingen aan wel en niet gekoelde drijfmest. Y-as emissies in mg/m<sup>2</sup>/u NH<sub>3</sub>. Per meetdag en behandeling geven de horizontale lijnen een vijf-getallensamenvatting: van onder naar boven minimum, eerste kwartiel, mediaan, derde kwartiel en maximum. De kruisjes zijn het gemiddelde, het bolletje een uitbijter. NB zowel de gekoelde en referentie mestkelder werd tweemaal daags gedurende tien minuten gemixt.



**Figuur 24** Boxplot van metingen aan wel en niet gekoelde drijfmest. Y-as emissies in mg/m<sup>2</sup>/u N<sub>2</sub>O. Per meetdag en behandeling geven de horizontale lijnen een vijf-getallensamenvatting: van onder naar boven minimum, eerste kwartiel, mediaan, derde kwartiel en maximum. De kruisjes zijn het gemiddelde, tijdens meting Mrt. 2022a werd geen N<sub>2</sub>O gedetecteerd en in meting Mrt. 2022b bij twee van de zes herhalingen zowel in de gekoelde als referentie kelder. NB zowel de gekoelde en referentie mestkelder werd tweemaal daags gedurende tien minuten gemixt.





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.

