



Testen, bemeten en doorontwerpen van mestkoelingssystemen als mitigatiestrategie in de melkveehouderij – Extern mest koelen

Daniel Puente-Rodríguez, Jan Vonk & Bram Bos

Rapport 1616



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Testen, bemeten en doorontwerpen van mestkoelingssystemen als mitigatiestrategie in de melkveehouderij – Extern mest koelen

Daniel Puente-Rodríguez, Jan Vonk & Bram Bos

Wageningen Livestock Research

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Livestock Research en gesubsidieerd door het ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoek thema 'Emissiereductie methaan veehouderij' (projectnummer BO-43.10-002-023).

Wageningen Livestock Research
Wageningen, januari 2026

Rapport 1616

Samenvatting NL: Het doel van deze studie was om te testen en te bemeten of een extern mestkoelingssysteem de temperatuur van de in mestkelders opgeslagen mest onder praktijkomstandigheden op een melkveebedrijf op 8-10 °C kan brengen en houden, om daarmee de methaanemissie uit mest fors (> 50%) te reduceren. Gedurende het jaar van dit experiment (case-control) werd de gemiddelde temperatuur van de gekoelde mest 10,3 °C. Dit resulteerde in een methaanemissiereductie uit mest van 89%. Aanvullend onderzoek is nodig om mestkoelingssystemen verder te ontwikkelen. De focus zou ook moeten liggen op het verminderen van andere emissies (integrale systemen), zoals ammoniak, en het benutten van de lage wintertemperaturen, zonne- en windenergie opgewekt op het primaire bedrijf, en de warmte die vrijkomt bij het koelen van drijfmest.

Summary UK: The aim of this study was to test whether an external manure cooling system can lower the temperature of manure stored in manure pits at 8-10 °C under practical conditions on a dairy farm. This to significantly reduce methane emissions from manure, i.e. > 50%. During the year of this (case-control) trial, the average temperature of the cooled manure was 10.3 °C. This resulted in an average methane emission reduction of 89% between case and control. Additional research is needed to further develop manure cooling systems. The focus should also be on reducing other emissions (integral systems), such as ammonia, and taking advantage of the low winter temperatures, solar and wind energy generated on the dairy farm, and the heat released when cooling slurry.

- 1) Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/708691> of op www.wur.nl/livestock-research (onder Wageningen Livestock Research publicaties).



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

© Wageningen Livestock Research, onderdeel van Stichting Wageningen Research, 2026

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.

Inhoud

1	Inleiding	5
1.1	Eerdere geteste prototypen	6
1.1.1	Mestkoelsysteem in mestkelders 1.0	6
1.1.2	Mestkoelsysteem in mestkelders 2.0 (+1.0)	7
1.1.3	Eerste test met extern mestkoelsysteem	8
1.2	Extern mest koelen	8
1.2.1	Melkveebedrijf Zandhoeve Holsteins	8
1.2.2	Testopstelling en systeembeschrijving	9
2	Methodologische aanpak	14
2.1	Temperatuurregistratie	14
2.2	Methaan(BKG)- en ammoniakemissiemetingen	15
2.2.1	Validatietest meetparaplu	18
2.3	Analyse mestmonsters	19
2.3.1	Mestanalyses Servicelab-WLR	19
2.3.2	AMP-bepalingen	19
3	Resultaten	21
3.1	Temperatuur	21
3.1.1	Handmatige temperatuurmetingen	22
3.1.2	Omgevingstemperatuur	24
3.2	Emissiemetingen	24
3.3	Analyse mestmonsters	26
3.3.1	Standaard mestanalyse	26
3.3.2	AMP-bepaling	28
3.4	Elektriciteitsverbruik	28
4	Mest koelingssystemen vergelijking – 1.0, 2.0 & Extern mest koelen	32
5	Mest koelen in combinatie met?	35
5.1	Extern mest koelen i.c.m. een traditionele roostervloer en mestkelder + vloer sproeien met koud water & EOW + externe opslag	36
5.2	Extern mest koelen i.c.m. een dichte vloer en mestschuif + sproeien met koud water + externe opslag	38
6	Conclusie	40
	Literatuur	41
Bijlage 1	Overzicht van meetresultaten bij uitgeschakeld mestkoelsysteem	44
Bijlage 2	Protocol for estimation of methane production rates in manure	45
Bijlage 3	Temperatuurgrafieken	48
Bijlage 4	Resultaten	49

1 Inleiding

Klimaat is een dynamisch natuurverschijnsel. De snelle veranderingen in het klimaat sinds 1900 kunnen echter worden toegeschreven aan de mens¹, door een combinatie van technologische en economische ontwikkelingen en politieke keuzes sinds de industriële revolutie. Het gebruik van steenkool, olie en aardgas in massaproductieprocessen resulteert in overmatige uitstoot van broeikasgassen (BKG) zoals koolstofdioxide (CO₂). Zonder BKG en het broeikasgaseffect zouden er ijzige temperaturen zijn. Maar een teveel aan BKG leidt tot opwarming van de aarde, extreem weer, zeespiegelstijging, veranderende zeestromingen, verwoestijning, overstromingen etc. en dat gebeurt in rap tempo. In Nederland is de gemiddelde temperatuur de afgelopen 130 jaar bijvoorbeeld met 1,7 graden Celsius gestegen². In januari 2024 meldde de klimaatdienst van de EU dat de opwarming van de aarde voor het eerst in een heel jaar de 1,5 graden Celsius had overschreden³.

Methaan is een sterk broeikasgas, één molecuul methaan is equivalent aan 28 moleculen CO₂ (CH₄ = 28 CO₂-eq) gerekend over een periode van 100 jaar ('Global Warming Potential' 100, Van der Net et al., 2025). Hoewel energie de sector is die de meeste emissies veroorzaakt in termen van de totale hoeveelheid broeikasgassen, stoot de landbouwsector in 2023 het meeste methaan uit, namelijk 70,7% van de totale Nederlandse methaanemissie (73,5% van de lachgasemissies en 12,3% van de totale broeikasgasemissies) (Van der Net et al., 2025). In 2023 werd er 9,2 Mton CO₂-eq enterisch methaan (uit de pens-fermentatie van herkauwdieren) en 3,8 Mton CO₂-eq methaan uit mestmanagement in veehouderijbedrijven uitgestoten (ibid.). Methaanemissies uit dierlijke mest dragen 2,6% bij aan de totale nationale BKG-emissies en 21,1% aan de landbouwbroeikasgasemissies (ibid.). Rundvee is verantwoordelijk voor 12,3% van de broeikasgasemissies en van ongeveer 80% van de methaanemissie in de landbouwsector (ibid., zie ook Van Bruggen et al., 2024).

De overheid heeft tot nu toe alle belangrijke juridisch bindende internationale afspraken ondertekend en geratificeerd (Van der Net et al., 2024) en vertaald naar beleid voor bijvoorbeeld het reduceren van de methaanemissie in de veehouderij. In het Klimaatakkoord (2019, blz. 119⁴) is voor 2030 verder een reductiedoelstelling van 1,2 - 2,7 Mton CO₂-eq afgesproken voor de gehele veehouderijsector. Daarnaast was in het regeerakkoord van het kabinet-Rutte IV (2021⁵) opgenomen dat het gaat om minimaal 1 Mton CO₂-eq reductie van methaanuitstoot. Op het moment van schrijven is het kabinet-Schoof gevallen en is de datum voor nieuwe verkiezingen bekend. Plannen met betrekking tot klimaat, methaan en veehouderij zijn nog onbekend.

De overheid stimuleert daarbij de productie van kennis over de werkingsmechanismen van emissies en de ontwikkeling van maatregelen om deze te reduceren. Dit onderzoek is gefinancierd door het Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur (LVVN) in het kader van het beleidsondersteunend onderzoeksprogramma klimaatontwikkeling 'Integraal Aanpakken'. Het onderzoek is uitgevoerd door het onderzoeksinstituut Wageningen Livestock Research (WLR)-Wageningen University & Research in samenwerking met Geothermica, L'orèl Consultancy en melkveebedrijf Zandhoeve Holsteins.

Temperatuur is een belangrijke factor die de methaanproductie beïnvloedt. Kennis over temperatuur en methaanproductie is voornamelijk ontwikkeld in de context van anaerobe vergisting, gericht op het stimuleren van biogasproductie (Zeeman, 1991; 1994; Amon et al., 2006a; 2006b; Chadwick et al., 2011; Rodhe et al., 2015; McVoy & Clark, 2019; Groenestein et al., 2020). Methaan wordt gevormd (methanogenese) onder anaerobe omstandigheden door micro-organismen die organisch materiaal afbreken.

¹ IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change (geraadpleegd augustus 2024).

² Klimaatverandering en gevolgen | Klimaatverandering | Rijksoverheid.nl (geraadpleegd augustus 2024).

³ Warmest January on record, 12-month average over 1.5°C above preindustrial | Copernicus (geraadpleegd februari 2024).

⁴ Klimaatakkoord | Publicatie | Klimaatakkoord https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2023-restemissieopgave-broeikasgassen-landbouw-landgebruik-4996_0.pdf (geraadpleegd december 2023).

⁵ https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2023-restemissieopgave-broeikasgassen-landbouw-landgebruik-4996_0.pdf (geraadpleegd december 2023).

Bij lage temperaturen zijn er weinig soorten methanogene micro-organismen die optimaal kunnen groeien (Jablonski et al., 2015; Dalby et al., 2021). Tijdens koude winterperiodes of in experimenten is al aangetoond dat het verlagen van de temperatuur van de mest een sterk effect heeft op het reduceren van methaanemissies uit mest (Safley & Westerman, 1994; Sommer et al., 2004; Ogink et al., 2014; Baldé et al., 2016; Elsgaard et al., 2016; Poteko et al., 2019; Im et al., 2020; Cárdenas et al., 2021).

Interessant is dat temperatuur ook invloed heeft op de ammoniakemissie (Aarnink & Elzing, 1998; Groot Koerkamp et al., 1998; Gustafsson et al., 2005; Wu et al., 2019; Aarnink et al., 2022). De stikstofopgave in Nederland is groot vanwege de doelstellingen rondom biodiversiteit (Vogel- en Habitatrichtlijn) en waterkwaliteit (Kaderrichtlijn Water). Volgens de Europese NEC-richtlijn uit 2016 moet Nederland in 2030 21 procent minder ammoniak uitstoten ten opzichte van 2005 (PBL, 2023). Daarnaast vereist de Wet stikstofreductie en natuurverbetering dat in minimaal 50% van het stikstofgevoelige areaal binnen beschermde Natura 2000-gebieden in 2030 de kritische depositiewaarde niet wordt overschreden en in 2035 ten minste 74%.

Dit onderzoek bouwt voort op eerdere experimenten die zijn uitgevoerd met mestkoelingssystemen. De rapportages van deze studies bespreken de werkingsmechanismen en literatuur over mesttemperatuur en methaan (en ammoniak) (Puente-Rodríguez et al., 2023; 2024). De resultaten van deze studies worden in dit rapport samengevat en in het licht van de resultaten van dit onderzoek geplaatst.

De doelstelling van dit onderzoek was het testen, analyseren en bemeten van een mestkoelingssysteem om de temperatuur van de opgeslagen mest onder praktijkomstandigheden van een melkveebedrijf onder 8-10 °C te brengen en te houden. Dit om de methaanemissie uit mest fors (> 50%) te kunnen reduceren. Daarnaast zijn ook andere factoren geïnventariseerd die van belang zijn voor de brede implementatie en adoptie van deze maatregel in de Nederlandse melkveehouderij.

Een verwant maar secundair doel van dit onderzoek was dat als het mestkoelingssysteem goed presteerde met betrekking tot de reductie van methaanemissie, maatregelen ter reductie van de ammoniakemissies ook zouden worden overwogen om te worden gecombineerd met dit systeem. Dit om een integraal systeem te ontwerpen. Theoretisch gezien kan het verlagen van de temperatuur van de mest ook de ammoniakemissie uit de mestkelder reduceren. Deze resultaten werden echter niet behaald met eerdere prototypen. Ammoniak ontstaat voor het grootste deel op de loopvloeren van melkveestallen (60-75%) en de rest komt uit de mestkelder (Van Dooren et al., 2019). Zo is in een kortdurend ontwerptraject aandacht besteed aan vloeren en aanvullende maatregelen tegen ammoniakuitstoot. Hierbij is een integraal systeem ontworpen rondom mestkoeling.

1.1 Eerdere geteste prototypen

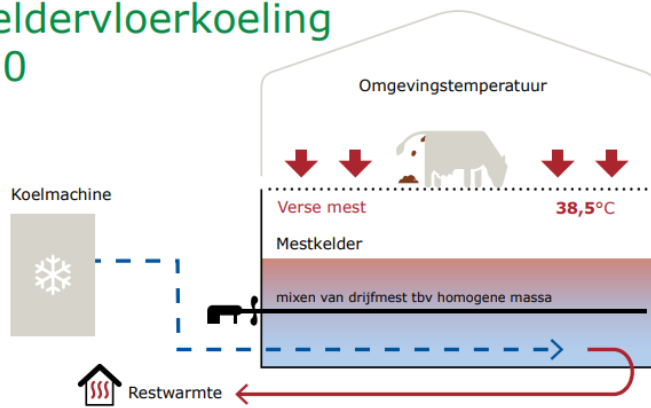
In deze paragraaf worden eerdere prototypen van mestkoelingssystemen kort besproken die door WLR en de bedrijven zijn getest. Deze zijn de voorlopers van het experiment met het prototype waarover in deze studie wordt gerapporteerd.

1.1.1 Mestkoelsysteem in mestkelders 1.0

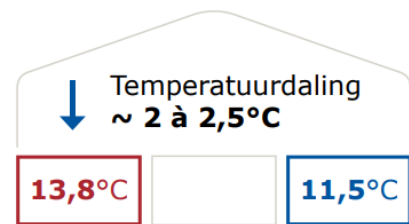
Het eerste prototype bestond uit een systeem van koelleidingen (200 m) dat in de bodem van de mestkelder van twee melkveebedrijven werd geplaatst. De veehouders van de melkveebedrijven Zandhoeve Holsteins (Hellum) en Melkveehouderij Ballingheim VOF (Holwierde) ontwierpen dit systeem samen met de bedrijven Geothermica en L'orèl Consultancy, ondersteund door een subsidie van de provincie Groningen. De doelstelling was destijds (2018-2019) om een systeem te ontwikkelen voor het verwarmen van de bedrijfswoningen. Deze melkveebedrijven hadden al een verwarmingssysteem met warmte uit de melkkoeling, maar dit was niet voldoende. Daarom werd warmte in de mest gezocht. Vanwege het theoretische positieve effect van het koelen van mest op emissies, is WLR sinds de winter van 2019 bij dit proces betrokken om de verdere ontwikkeling te faciliteren en emissiemetingen uit te voeren.

Vanwege de stal en kelder structuur op het melkveebedrijf in Hellum is een case-control opstelling gemaakt voor emissiemetingen (dit wordt nader toegelicht in Paragraaf 1.2.2). Het gemiddeld temperatuurverschil van de opgeslagen mest tussen de met het 1.0-systeem gekoelde mestkelder en de niet-gekoelde mestkelder was 2 à 2,5 °C in het jaar van de meetreeks en er werd een reductie van de methaanemissie uit mest van circa 45% gemeten, maar ook een toename van de ammoniakemissie van circa 75%. Hiervoor heeft de warmtepomp 8.233 kWh en de mixer 1.005 kWh gebruikt, in totaal dus slechts 9.238 kWh. Zie Hoofdstuk 2 in Puente-Rodríguez et al. (2023) voor de methodologische aanpak, resultaten en reflectie op dat systeem.

Keldervloerkoeling 1.0



Temperatuurverschil



Figuur 1 Gesimplificeerd schema van Mest koelen 1.0 en bereikte gemiddelde temperatuurdaling, case-control.

1.1.2 Mestkoelsysteem in mestkelders 2.0 (+1.0)

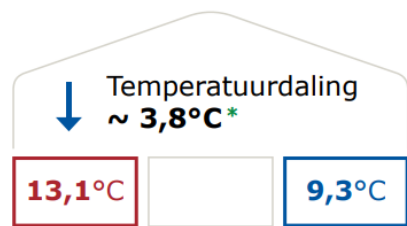
Vanwege de relatief goede methaanemissiereductie die met het 1.0-systeem werd behaald, werd in mei 2021 een nieuw prototype (2.0) geïnstalleerd in het melkveebedrijf in Hellum. Het systeem bestond onder andere uit 400 meter koelleidingen die in de drijfmest dreven. Er werd een drijvend systeem ontworpen omdat o.a. warmte opstijgt en verse mest van melkkoeien een hogere temperatuur heeft dan die al in de kelder is opgeslagen – melkkoeien hebben een lichaamstemperatuur van ca. 38,5 °C. De koelleidingen dreven dankzij boeien, maar lagen net onder het mestoppervlak. In het eerste experiment met 1.0 werd de mest in de kelders dagelijks gemixt om een homogene temperatuur te garanderen. Dit gebeurde zowel in de case- en control-kelder, teneinde overige omstandigheden die de emissies kunnen beïnvloeden zoveel mogelijk gelijk te houden. De verwachting/hoop was dat dit bij 2.0 niet of minder nodig zou zijn, maar uiteindelijk werd toch een dagelijks mestmix-regime ingevoerd. Verder was het oorspronkelijke idee om 2.0 op zichzelf te testen. Echter, vanwege onder andere ijs- en korstvorming rond de drijvende koelleidingen en een hogere warmtebehoefte bij de bedrijfswoning, was het 1.0-systeem in totaal circa 238 dagen in gebruik in verschillende periodes gedurende het jaar van de meetreeks (24-05-2021 tot en met 12-04-2022) van het experiment met 2.0.

Met deze twee systemen samen werd een gemiddeld temperatuurverschil tussen case- en controlmestkelders van 3,8 °C bereikt. Tijdens de meetperiode werd een gemiddelde methaanemissiereductie van 69% bereikt en een gemiddelde toename van de ammoniakemissie van 9%. Hiervoor was 27.226 kWh aan elektriciteit nodig. Zie Puente-Rodríguez et al. (2024) voor de volledige analyse van de resultaten van dit experiment.

Drijvende koeling 2.0



Temperatuurverschil



Figuur 2 Gesimplificeerd schema van Mest koelen 2.0 en bereikte gemiddelde temperatuurdaling, case-control.

1.1.3 Eerste test met extern mestkoelsysteem

Op basis van de ervaringen met 1.0 en 2.0 koelingssystemen in de mestkelders werd geconcludeerd dat de lengte aan koelleidingen in de kelders groter moest zijn om de temperatuur nog verder te verlagen en de noodzaak van mixen te beperken. Mixen is een factor die de ammoniakemissie versterkt (Van der Stelt et al., 2007; Calvet et al., 2017). Daarbij was korstvorming bij de drijvende koelleidingen een risico voor de implementatie van dit systeem. Bovendien zijn systemen onder de roostervloer normaal gesproken niet populair bij veehouders en monteurs. Daarom is in 2021 een prototype ontworpen om mest extern (buiten de kelder en de stal) te koelen, dat vervolgens is geïnstalleerd en gedurende een korte periode getest op het melkveebedrijf van de familie Boersen (Mts. E., L. en M. Boersen-Rigter) in Haulerwijk. In dit experiment zijn geen emissiemetingen uitgevoerd. Het doel was om de technische mogelijkheden van dit systeem te onderzoeken. Zie Hoofdstuk 3 in Puente-Rodríguez et al. (2024) voor meer informatie over dat experiment. Vanwege de positieve ervaringen met het systeem werd besloten om dit externe mestkoelingssysteem te installeren, verder te testen en te bemeten op het melkveebedrijf in Hellum. Het externe mestkoelsysteem wordt hieronder uitgelegd.

1.2 Extern mest koelen

1.2.1 Melkveebedrijf Zandhoeve Holsteins



Het experiment werd uitgevoerd op het melkveebedrijf Zandhoeve Holsteins. De familie Van Tilburg runt dit bedrijf in het Groningse dorp Hellum. Tijdens dit experiment werden de melkkoeien gehuisvest in een natuurlijk geventileerde ligboxstal van rond de 1.052 vierkante meter. Het bedrijf heeft ook andere gebouwen op het erf, zoals de bedrijfswoning en een nieuwe stal waar droogstaande koeien werden gehouden. Tijdens het experiment bestond de Holstein-Friesian melkveestapel uit circa 168 melkkoeien, waarvan ongeveer 33 vaarzen en circa 27 droogstaande koeien, plus ongeveer 81 stuks jongvee. De melkkoeien hadden een gemiddeld levend gewicht van ongeveer 675 kg (op basis van inschattingen van de melkveehouder). De gemiddelde melkproductie was 9.000 kg per koe per jaar (4,23% vet en 3,49% eiwit). Het rantsoen bestond uit ingekuuld 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 liepen ze dag en nacht buiten en kwamen ze twee keer per dag binnen om gemolken te

worden en stonden ze circa 1,5 uur in de stal voor voer na het melken. Ze waren in deze periode dus ongeveer 3 uur per dag in de stal aanwezig. De rest van het jaar stonden ze de hele dag in de stal. Het bedrijf beschikt over 70 ha grasland en 14 ha maïsteelt. Ook beschikt het melkveebedrijf over 1.060 zonnepanelen en twee windmolens van ieder ongeveer 14 kW.

1.2.2 Testopstelling en systeembeschrijving

De traditionele melkveeststal heeft een betonnen roostervloer voorzien van een mestschuif. Onder de roostervloer bevinden zich mestkelders waar de drijfmest wordt opgeslagen. De opslagcapaciteit bedraagt 5 maanden met het genoemde aantal koeien. De case-control testopstelling werd mogelijk gemaakt doordat er aan weerszijden van de centrale voergang twee vergelijkbare staldelen waren, wat betreft het aantal ligboxen, loopoppervlak en ook mestkelders. In één van deze mestkelders werd de mest gekoeld (case), en aan de andere kant van de stal werd de mest niet gekoeld en werd deze kelder de referentie (of control) van de studie. In *Figuur 3* is 'case' blauw en 'control' rood gemarkeerd. De gekoelde mestkelder was 64 m lang, 4,65 m breed, had een oppervlak van ongeveer 300 m² en was deels 1,5 en deels 2 m diep. De niet-gekoelde mestkelder had vergelijkbare dimensies. De keldermuren waren niet geïsoleerd. Net buiten deze stal is een (ondergrondse) mestopslag onder de inkuil-sleufsilo (met een capaciteit voor 680 m³ drijfmest).



Figuur 3 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.

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.

Tussen case en control mestkelders bevond zich een niet-gekoelde tussen-mestkelder, gemarkeerd in het groen in *Figuur 3*. Tussen deze kelder en de case en control kelders waren twee hoge openingen (circa 0,8 m hoog, 2 m breed), waardoor mest van de ene kelder naar de andere kon worden uitgewisseld in geval van volle kelders. Om dit te voorkomen, werd een scheidingswand geplaatst tussen de gekoelde kelder en de tussenkelder (zie foto hiernaast)⁶.

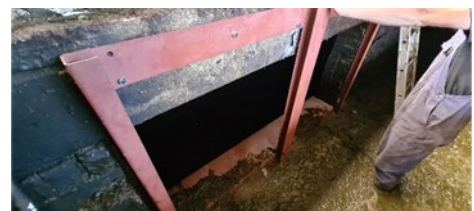
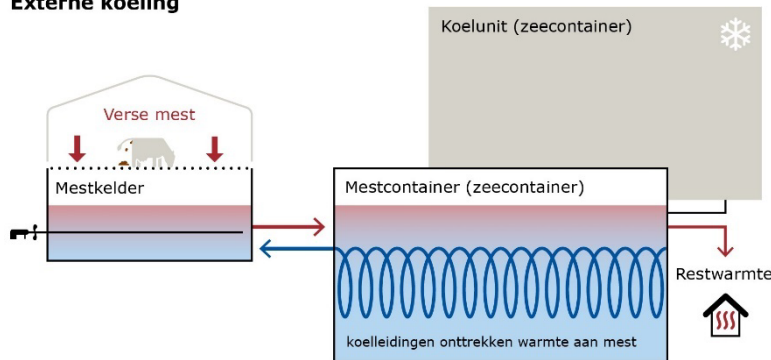


Foto 1 Schot tussen gekoelde en tussenliggende mestkelders.

⁶ Deze openingen worden gebouwd om te voorkomen dat er te veel druk op de muren tussen de mestgangen in de kelder komt. Mocht de ene gang te vol raken, dan kan de mest via de opening overstromen in de andere mestgang. Tijdens dit onderzoek is gebleken dat het geplaatste schot niet waterdicht was.

Net buiten de stal stond de mestkoelingsinstallatie. De opstelling bestond uit een mestcontainer, een zeecontainer met de koelunit, een pompsysteem, plus slangen en verbindingselementen, zie hieronder en ook *Figuur 7*.

Externe koeling



Figuur 4 Gesimplificeerd schema van Extern mest koelen.

De mest in de gekoelde mestkelder werd met een pomp aangezogen. Dit was een verdringerpomp (Kuijpers RVS SK132MH/4 TF 7,5 kW, capaciteit 40 m³/uur) die horizontaal was gemonteerd, daarvoor stond een snijder (Stallkamp SF 300/3kW M1708) in een frame gemonteerd. Het geheel was gemonteerd op twee betonplaten, zie *Foto 2*. De besturingskast werd op de wand van de naastliggende sleufsilo bevestigigd.



Foto 2 Pompinstallatie met rechts besturingskast.

De pomp transporteerde de mest naar een mestcontainer (capaciteit circa 40 m³)⁷. In deze container werden 450 m koelleidingen (Powerwave PE100RC, met een diameter van 63 mm) geplaatst, zie *Foto 3*. Door deze leidingen stroomde een mengsel van water (75-80%) en glycol (20-25%) om de mest te koelen en bevriezing te voorkomen. De mestcontainer werd afgedekt met een zeil om ammoniakemissie te reduceren. Er werden geen emissiemetingen uitgevoerd op deze container. Een dichte container is emissie-technisch beter/verstandiger maar voor technologisch ontwikkelings- en onderzoeksdoeleinden werkte een toegankelijke container beter.

⁷ In het begin van het experiment werd de mest opgepompt vanuit de mestbuis die de gekoelde mestkelder verbindt met de (ondergrondse) mestopslag onder de inkuil-sleufsilo. De mestbuis was voorzien van een afsluiter, de mestpomp werd aan de kant van de gekoelde mestkelder aangesloten. Sinds 8 mei 2023 werd de mest rechtstreeks uit de mestkelder gepompt.

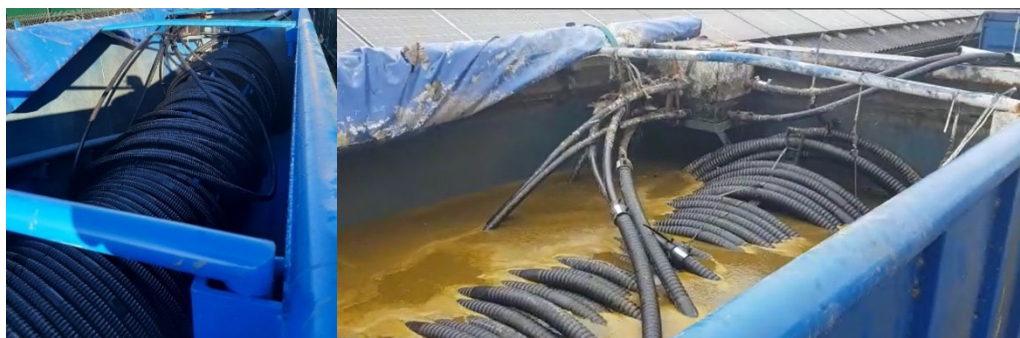


Foto 3 *Impressie van de mestcontainer met de koelleidingen.*

Vanuit de pomp komt de mest via een flexibele leiding boven in deze mestcontainer terecht. Deze leiding loopt binnen de container naar beneden, waardoor de mest onder in de container uitstroomt. Een andere leiding die hoog in de container is gemonteerd, zorgt ervoor dat de gekoelde mest door zwaartekracht vanuit de container naar de kelder stroomt. Na ongeveer 5 maanden functioneerde het systeem niet meer naar wens en werd er sedimentatie en ijsvorming op de bodem geconstateerd. Daarom werd besloten om een afvoerputje onder in de container te boren om de container af en toe schoon te maken. Op deze manier werd de container gedurende het jaar van het onderzoek twee keer schoongemaakt.



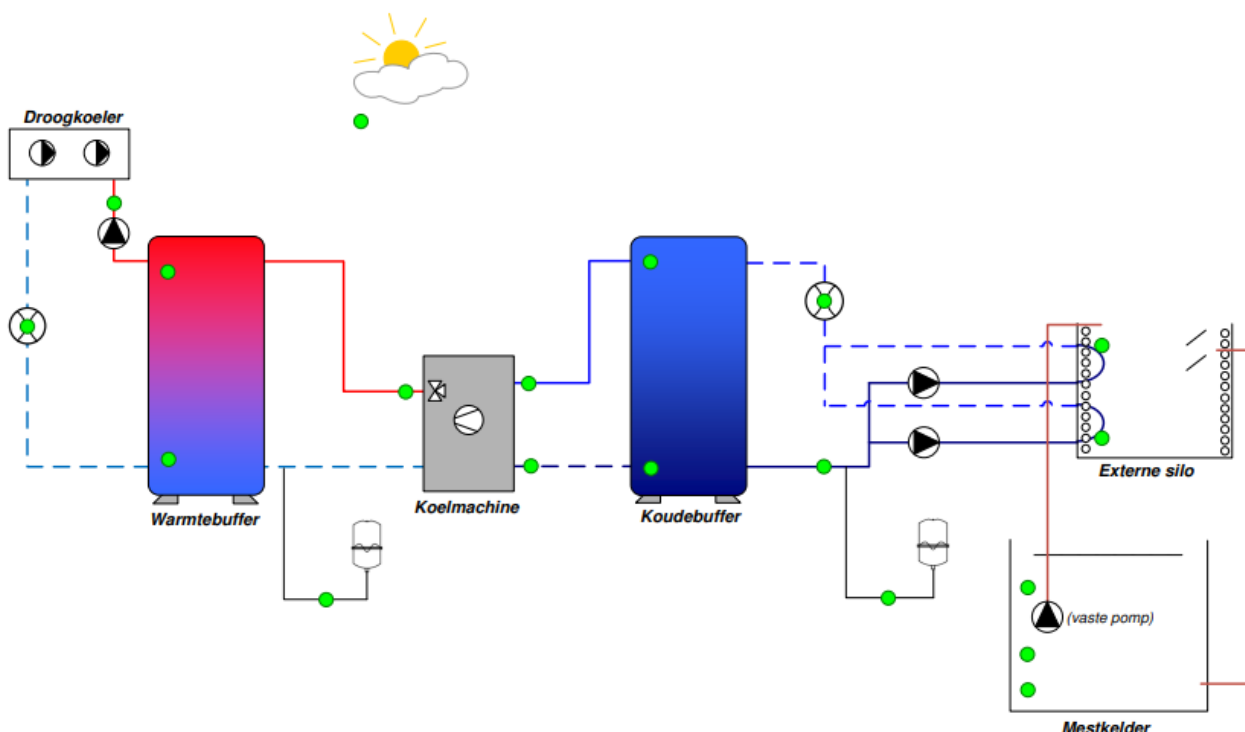
Figuur 5 *Van links naar rechts: (1) instroom (rode pijl) en uitstroom (groene pijl) van de mestcontainer. (2) Instroom gekoelde mest langs de stalmuur in de kelder. (3) Het bezinksel op de bodem van de mestcontainer. (4) Impressie van afvoeropening onderaan de container (rode ellips).*

Naast de mestcontainer stond een zeecontainer (de koelunit) met de warmtepomp en alle andere elementen van het koelingssysteem. Het water-glycolmengsel dat door de koelleidingen in de mestcontainer liep, transporteerde de onttrokken warmte naar de koelunit. De unit bevatte onder andere een circulatiepomp om deze koelvloeistof tussen de mestcontainer en de koelunit te laten circuleren, een elektrische warmtepomp (MasterTherm AQ90i, 48 kW vermogen) en een koude- en warmtebuffer (capaciteit 800 liter, Elbi AR800). De overtollige warmte werd afgevoerd naar de buitenlucht met behulp van een droogkoeler die boven op de zeecontainer was geïnstalleerd. Zie *Figuur 6* en *Foto 4*.



Foto 4 Impressie van de koelvloeistof aansluiting (links). Binnen- en buitenkant impressie van de koelunit (midden/rechts).

Om de opgeslagen mest in de kelders te mixen had de veehouder 2 elektrische mestmixers. Opgeslagen mest wordt gemixt om het te homogeniseren en de verpompbaarheid te verbeteren. In de praktijk gebeurt dit niet vaak, ergens tussen één keer per week en één keer per maand en telkens gedurende één uur per keer. Voor het begin van de meetreeks werd geprobeerd om de mixers niet te gebruiken vanwege het verwachte rondpompeffect dat het uitpompen en terugbrengen van koude mest zou kunnen veroorzaken op de homogene temperatuur van de mest. Dit was niet het geval en er werd besloten om deze elektrische mixers twee keer per dag gedurende 10 minuten aan te zetten. Dit met als doel de temperatuur van het totale mestvolume te verlagen. Ook werd besloten om hetzelfde mestmix-regime toe te passen als in eerdere onderzoeken om het effect van koeling (onafhankelijk/ondanks mixen) te kunnen bestuderen. Zoals eerder vermeld, heeft het mixen van mest ook effect op emissies.



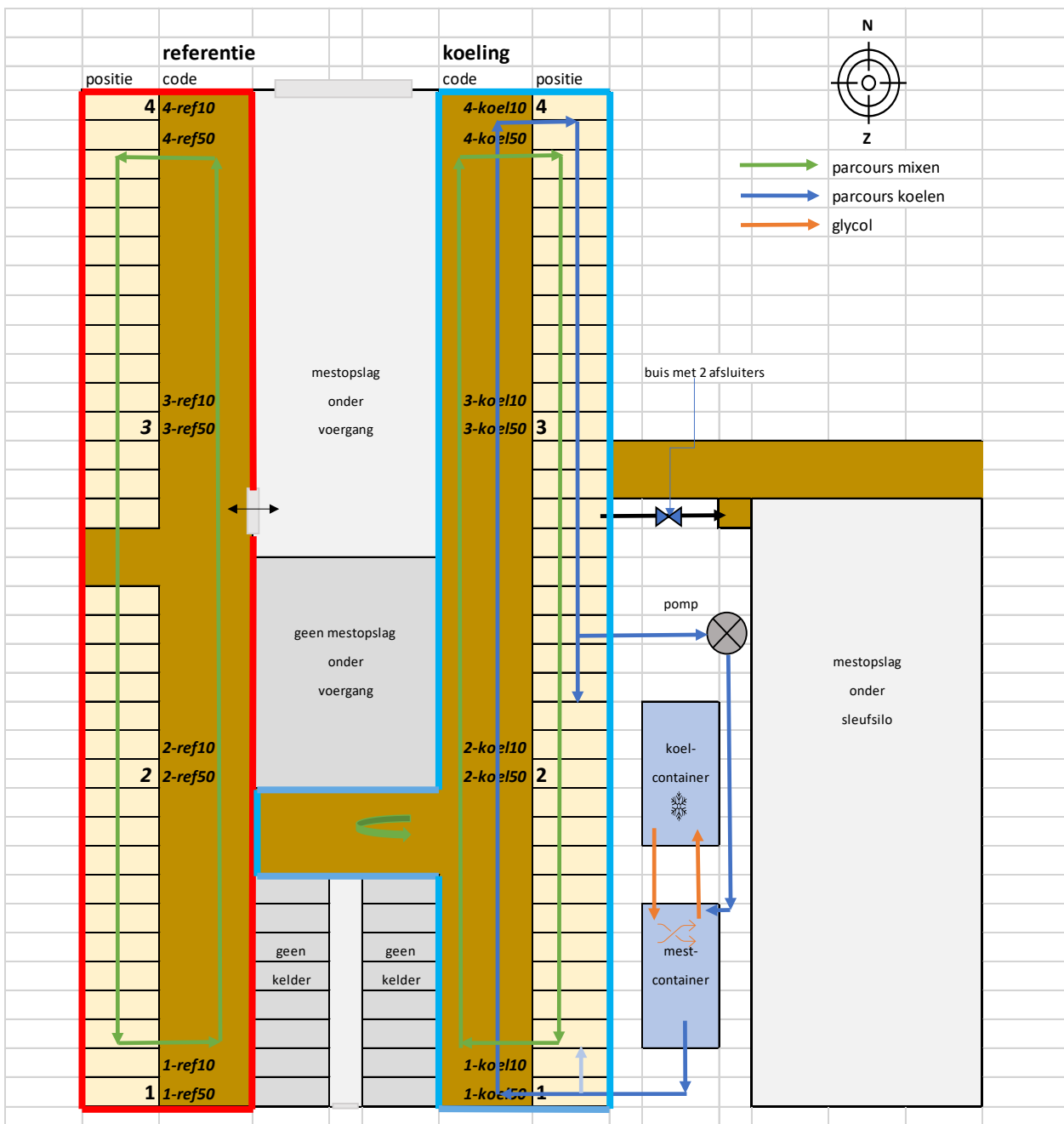
Figuur 6 Schema extern mest koelen systeem. Bron: Geothermica.

Na de installatie en afstelling werd het systeem op 21 oktober 2022 ingeschakeld. Vervolgens werd gecontroleerd of de mesttemperatuur verlaagd kon worden zonder de mestmixer, waarbij er problemen ontstonden met de circulatiepomp. Deze werd vervangen en uiteindelijk kon de eerste emissiemeting worden uitgevoerd op 1 februari 2023 en de laatste op 27 november 2023 (zie Paragraaf 2.2). Op 18 augustus werd het mestkoelingssysteem uitgeschakeld omdat er niet genoeg mest in de kelder(s) was om de mest langs het systeem te laten circuleren. De veehouder streeft naar maximale weidegang. Vanwege de hoge temperaturen van de herfst in combinatie met persoonlijke omstandigheden bij het melkveebedrijf begin oktober, werd het systeem op 23 oktober 2023 weer ingeschakeld.

2 Methodologische aanpak

2.1 Temperatuurregistratie

In de referentie en gekoelde mestkelders werden weerstandsthermometers⁸ geïnstalleerd om continu de temperatuur van de mest te meten. Ze werden voorzien van een thermoplastisch rubber ter bescherming. In augustus 2022 werden de thermometers gekalibreerd voordat ze in de mestkelder werden geplaatst.



Figuur 7 Schema van de testopstelling met de referentiekelder in het rood en de gekoelde mestkelder in het blauw. De bruine stroken geven de loopgangen weer en de geblokte de ligboxen. De groene pijlen geven de mestcircuits bij mixen in de twee kelders aan, de blauwe hoe de gekoelde mest circuleert tussen kelder en de buitenunit en de oranje pijlen geven de beweging van koelvloeistof tussen de mestcontainer en de koelunit aan. Verder is in tekst en cijfers de positie van de 8 plekken waar thermometers op twee hoogtes (10 cm en 50 cm boven bodem kelder) zijn geplaatst te zien.

⁸ 4-WIRE AIRTIGHT PROBE IN THERMOPLASTIC RUBBER (italcoppie.it).

In beide mestkelders werden op vier vergelijkbare locaties thermometers geplaatst. Per locatie werd op twee hoogtes één thermometer geplaatst, namelijk op 10 cm en op 50 cm van de kelderbodem. In totaal werden 16 thermometers geplaatst, 8 per kelder op 4 locaties. Elke 5 minuten werd de gemeten temperatuur opgeslagen door een datalogger.

Tijdens de meetdagen (zie volgende paragraaf) werden er ook handmatige temperatuurmetingen uitgevoerd. Dit gebeurde op de (4+4) posities waar de continue temperatuurmetingen werden uitgevoerd. De temperatuur van de mest in de case en control kelders werd gemeten in stappen van 20 cm vanaf het mestoppervlak.

2.2 Methaan(BKG)- en ammoniakemissiemetingen

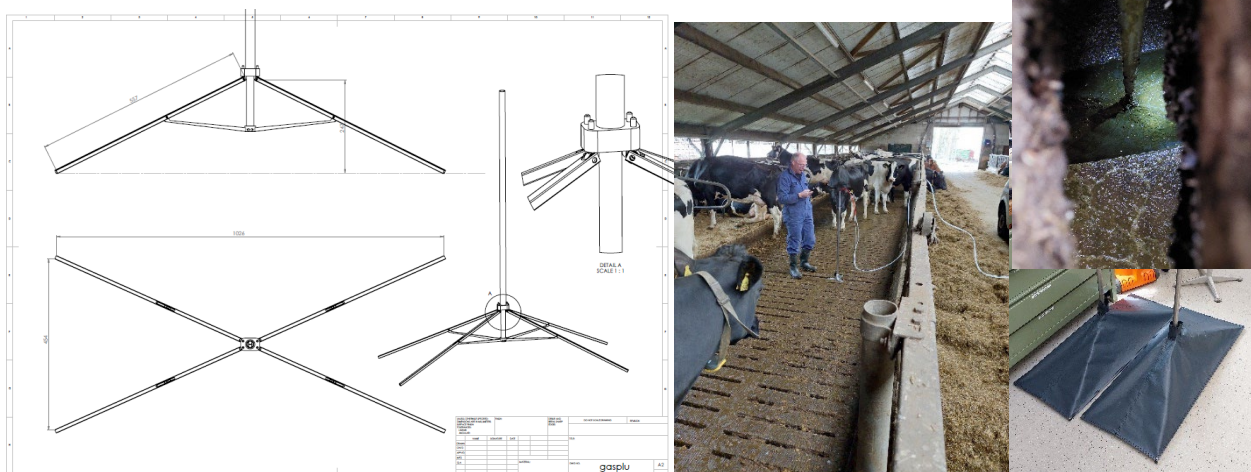
Uit de opgeslagen mest in de case-control kelders werden emissies van de broeikasgassen methaan en lachgas (N₂O) bepaald met de paraplumethode (zie hieronder). Ook werden de ammoniakemissies gemeten. Verspreid over een jaar werden op 6 dagen emissiemetingen uitgevoerd om seizoensinvloeden mee te kunnen nemen in dit onderzoek. Er werden meer metingen uitgevoerd. Sommige meetdagen werden verplaatst omdat de kelders leeg waren en andere werden gebruikt om de paraplumethode te valideren, zie *Tabel 1*.

Tabel 1 Emissiemeetdagen en bijzonderheden.

Dag (2023) Bijzonderheden	
01-02	
22-03	
03-05	
14-06	
19-07	
06-09	Gecancelld, kelders leeg
27-09	Vergelijkingsmeting, met koelsysteem uitgeschakeld
18-10	Vergelijkingsmeting, met koelsysteem uitgeschakeld
29-11	
07-12	Validatietest meetparaplu

- Tussen 18-08 en 23-10 was het koelsysteem uitgeschakeld. Vanwege het goede nazomerweer en het weidegangbeleid werd van deze gelegenheid gebruikgemaakt om te controleren of er structurele verschillen (in temperatuur en emissies) tussen beide kelders waren. Deze metingen zijn uitgevoerd zoals in deze paragraaf (2.2) wordt uitgelegd. Zie Bijlage 1 voor de resultaten van deze metingen.
- Op 7 december werden een aantal emissiemetingstesten uitgevoerd om op locatie de paraplu en de Lindvalldoos methoden te vergelijken (zie Paragraaf 2.2.1).

De primaire focus van dit onderzoek lag op de methaanemissies uit mest, de case en control mestkelders bevonden zich in dezelfde stal/ruimte en waren zeer moeilijk (onmogelijk) te scheiden/af te sluiten, daarom werden om het enterisch gevormde methaan uit te kunnen sluiten de emissiemetingen onder de roostervloer op het mestoppervlak uitgevoerd. Dit gebeurde met een zogenaamde 'meetparaplu', zie *Figuur 8*. De meetparaplu werd ontworpen als alternatief voor het meten met de fluxkamers (Lindvalldoos of meetbox) waarbij het meestal nodig is om zware betonelementen van de roostervloeren los te zagen of te demonteren, wat ook onrustiger is voor de kudde. Er werden meetparaplu's op maat gemaakt om te zorgen dat in gesloten positie deze door de spleten van een roostervloer pasten. Om de paraplu onder de roosters te kunnen openen, mogen de kelders echter niet volledig zijn gevuld met mest, een ruimte van minimaal 35 cm boven het mestoppervlak is nodig om de paraplu te kunnen openen.



Figuur 8 Meetparaplu-ontwerp (links, bron: Technical Development Studio – WUR) en foto's (rechts).

Op de 6 meetdagen die gebruikt zijn om conclusies te trekken in dit rapport⁹, zijn metingen uitgevoerd op 6 locaties in de gekoelde mestkelder en op 6 vergelijkbare locaties in de niet-gekoelde mestkelder. 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) en de paraplumetingen uitgevoerd.

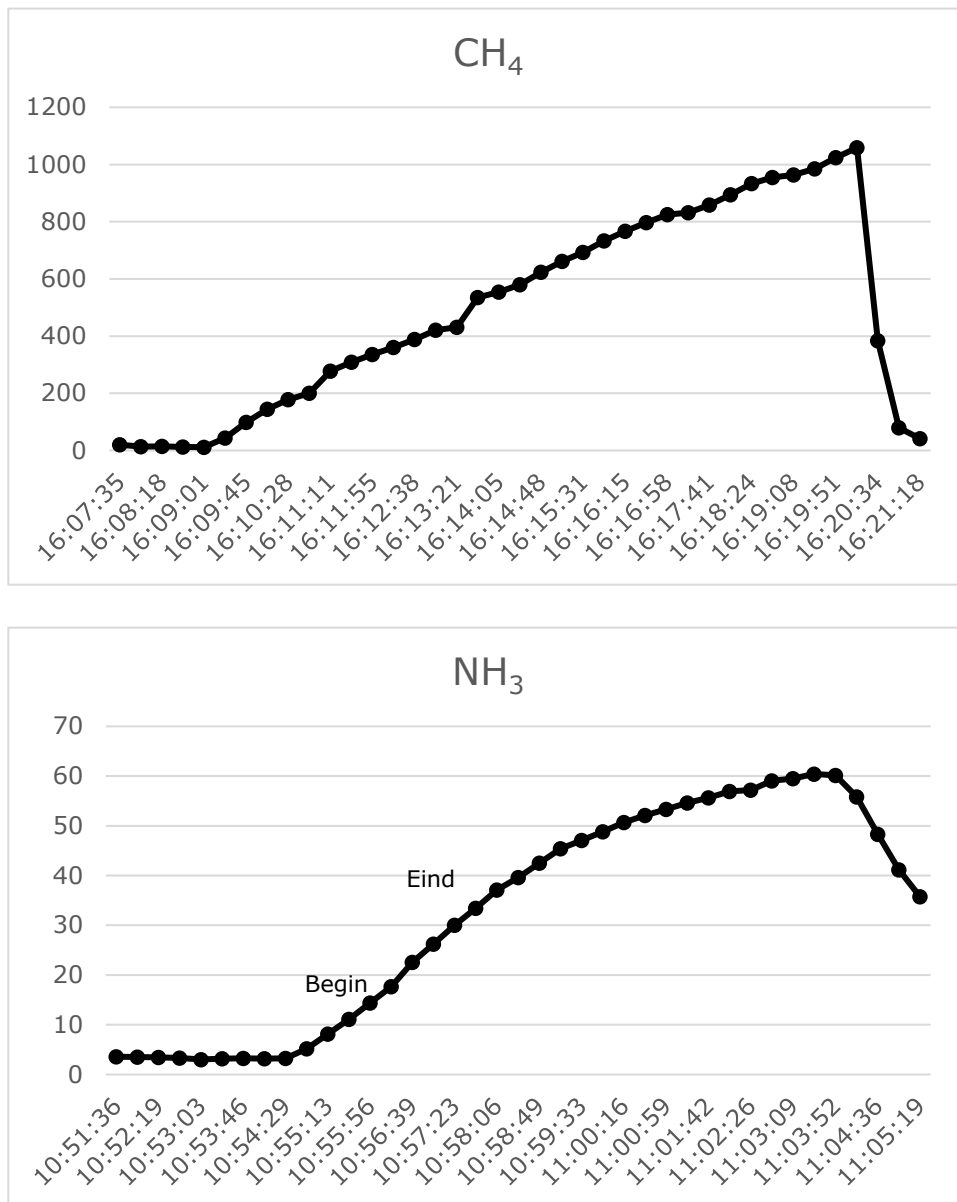
De concentratie(-opbouw) onder de paraplu is op het melkveebedrijf gemeten met een 'Fourier-transform infraroodspectroscopie' (FTIR) monitor (type DX-4000; Gasmeter Technologies Oy, Helsinki Finland), zie Foto 5. Data werd geanalyseerd met de bij de FTIR horende applicatie Calcmeter (versie 12.202). In de software werden 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.



Foto 5 FTIR-monitor in werking tijdens meetdag op 27 september 2023.

⁹ De referentiemetingen (27-09-2023 en 18-10-2023) waarbij het koelingssysteem was uitgeschakeld, zijn niet in de in de conclusies opgenomen. Deze worden wel in Bijlage 1 gepresenteerd.

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 9* geeft een voorbeeld van een geslaagde meting. Vaak is de waargenomen stijging in de concentraties echter minder eenduidig. Het kan zijn dat emissiesnelheid wijzigt of na verloop van tijd toch enige uitwisseling met de kelderlucht optrad. Omdat de oorzaak hiervan niet duidelijk is, zijn deze gevallen bij de dataverwerking meegenomen in de resultaten. Als hierdoor fouten zouden zijn opgetreden is het aannemelijk dat dit in gelijke mate bij de gekoelde en referentie mestkelder zou zijn gebeurd.



Figuur 9 Voorbeeld van CH₄- en NH₃-meting met de meetparaplu (resp. gekoelde kelder, 29-11-2023 en referentiekelder, 19-07-2023). Op de Y-as staan de door de FTIR gemeten concentraties in ppm. Bij CH₄ werden de metingen een minuut na het begin en voor het einde van de genoteerde meetperiode gebruikt voor het berekenen van de emissie. Voor NH₃ 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 was geplaatst afnam door de concentratie in de ruimte, werd hier visueel de periode waarin emissiesnelheid stabiel was vastgesteld. Vervolgens werd de emissie uitgedrukt in mg/m²/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 CH₄, 0,71 mg NH₃ of 1,83 mg N₂O (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 CH₄ daarnaast alleen NH₃ en N₂O onderzocht. Bij de beoordeling van stijglijnen werd mede gekeken naar CO₂, maar de emissies van dit gas zijn hier niet gerapporteerd omdat ze deel uitmaken van de zogenaamde korte kringloop.

2.2.1 Validatietest meetparaplu

De meetparaplu is een nieuw meetinstrument dat door WLR is ontworpen om emissiemetingen onder roostervloeren in veehouderijbedrijven uit te voeren met zo min mogelijk impact op de dagelijkse bedrijfsvoering. Het biedt mogelijkheden om in beperkte tijd op meer locaties in een stal metingen uit te voeren. In 2020 werd tijdens het experiment met het eerste mestkoelingssysteem (1.0) de statische meetparaplu-methode al vergeleken met de beter bekende dynamische boxmeting gedurende twee meetdagen en werden ook referentiemonsters geanalyseerd (Puente-Rodríguez et al., 2023). Dit samen met de toenemende ervaring met de meetparaplu gaf vertrouwen in het instrument. Ter controle werden aan het einde van de meetreeks bij het externe mestkoelingssysteem op 7 december een aantal emissiemetproeven uitgevoerd in Hellum om de meetparaplu- en de Lindvalldoos methoden te vergelijken.

Met de Lindvalldoos werd nu eveneens statisch gemeten, dus met recirculerende lucht in plaats van een van buitenaf komende luchtstroom door de box heen. Op elke meetplek vond eerst een meting met de Lindvalldoos plaats, gevolgd door de paraplu op zoveel mogelijk hetzelfde oppervlak. Door de verschillende vorm en afmeting komen deze echter niet volledig overeen, en vond bij verwijdering van de Lindvalldoos bovendien enige verstoring van het mestoppervlak plaats. Zou eerst met de paraplu gemeten worden dan is effect naar verwachting groter, daar deze met het doek op de mest rust waar de Lindvalldoos op een frame met een relatief dunne rand ligt.

Er vonden zo een drietal herhalingen plaats, dus zes metingen totaal met de gebruikelijke duur van tien minuten. Tijdens elk hiervan werd bovendien een instantaan luchtmonster genomen, voor latere lab analyse met gaschromatografie als de referentiemethode voor broeikasgassen. Vervolgens werden nog twee herhalingen (vier metingen totaal) uitgevoerd gedurende minimaal dertig minuten, teneinde ook referentiemonsters voor ammoniak te kunnen nemen. Dit betreft een nat-chemische monsternamen gevolgd door fotometrische bepaling in het lab zoals beschreven door Mosquera et al. (2019).

De resultaten laten voor methaan duidelijk hogere (+ 84%) en voor ammoniak juist lagere (- 83%) waarden voor de paraplu vergeleken met de Lindvalldoos zien. Mogelijk dat de wijze waarop lucht gecirculeerd wordt hier een rol speelt, de Lindvalldoos heeft een eigen circulatiesysteem waar bij de paraplu de enige menging van de bemonsterde lucht komt. Een andere mogelijkheid is dat het herhaalde, in vaste volgorde meten en/of de verstoring van het mestoppervlak tot structurele bias heeft geleid. Voor ammoniak zou ook absorptie aan het doek van de paraplu nog een rol kunnen spelen. Bij case-control onderzoek met resultaten in relatieve termen zoals een reductiepercentage, zijn deze effecten van minder belang. Absolute getallen moeten echter met de nodige voorzichtigheid geïnterpreteerd worden, en nader onderzoek naar de oorzaken hiervan is wenselijk.

Labresultaten voor momentane broeikasgasmonsters laten gemiddeld een goede overeenkomst zien voor methaan (en kooldioxide), maar per meting zijn verschillen tot ± 30% mogelijk. De gebruikte FTIR-monitor onderschat voor lachgas echter structureel (tot ca. 50% per meting). Bij ammoniak lijkt het verschil ten opzichte van de referentie bij metingen met de paraplu groter uit te vallen dan voor de Lindvalldoos.

Gemeten concentraties zijn zoals vermeld echter eveneens lager, waardoor verschillen in relatieve zin al snel groter uitvallen. Deze zaken verdienen nadere aandacht wanneer tot een volledige validatie overgegaan zou worden.

2.3 Analyse mestmonsters

In deze studie werden mestmonsters genomen en werd de Actuele Methaan Productie (AMP) bepaald naast de reguliere mestanalyses. Elke meetdag werden mestmonsters verzameld uit de case en control kelder met een Eijkkelkamp 'multisampler'¹⁰ (transparante monsterbuis) met een diameter van 30 mm. Met de monsternamebuis werd zoveel mogelijk de gehele mestkolom bemonsterd. Op minimaal 6 locaties verspreid over de mestkelder werden meerdere (deel)monsters genomen om voldoende (representatief) materiaal te verzamelen. De (deel)monsters werden verzameld in een emmer, geroerd/geschud, waarna de temperatuur werd gemeten voor de bepaling van de AMP (zie Paragraaf 2.3.2). De mestmonsters voor de AMP-bepaling werden in thermosflessen gedaan. Direct na monstername werden deze monsters per koerier naar LeAF¹¹ gebracht, het laboratorium in Wageningen dat de AMP-analyses uitvoert. Mestmonsters werden ook in een kunststof monsterpot gedaan voor de reguliere mestanalyses in het Servicelaboratorium van WLR, zie volgende paragraaf.

2.3.1 Mestanalyses Servicelab-WLR

In het laboratorium van WLR zijn de mestmonsters (case-control) geanalyseerd op de volgende parameters:

- Totaal stikstof (N)
- Ammonium-N (NH₄-N)
- Totaal fosfor (P)
- Kalium (K)
- Droge stof (ds)
- Anorganische stof (as)

Deze analyses zijn uitgevoerd conform gangbare normen, zie *Tabel 2*. De resultaten werden per element met eenzijdige t-testen beschouwd om te toetsen op statistisch significante verschillen tussen case en control.

Tabel 2 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	www.nen.nl/nen-7430-1998-nl-31959
7431	NEN 7431:1998 nl	Dierlijke mest en mestproducten - Monstervoorbehandeling door mengen, drogen en malen - Stapelbare mest	www.nen.nl/nen-7431-1998-nl-31962
7432	NEN 7432:1998 nl	Dierlijke mest en mestproducten - Bepaling van de gehalten aan droge stof en organische stof - Gravimetrische methode	www.nen.nl/nen-7432-1998-nl-31721
7433	NEN 7433:2020 nl	Dierlijke mest en mestproducten - Monstervoorbehandeling voor de bepaling van stikstof, fosfor en kalium - Ontsluiting met zwavelzuur, waterstofperoxide en kopersulfaat	www.nen.nl/nen-7433-2020-nl-270229
7434	NEN 7434:1998 nl	Dierlijke mest en mestproducten - Bepaling van het gehalte aan stikstof in destruaten	www.nen.nl/nen-7434-1998-nl-31723
7435	NEN 7435:2019 nl	Dierlijke mest en mestproducten - Bepaling van het gehalte aan fosfor in destruaten	www.nen.nl/nen-7435-2019-nl-265336
7436	NEN 7436:1998 nl	Dierlijke mest en mestproducten - Bepaling van het gehalte aan kalium in destruaten	www.nen.nl/nen-7436-1998-nl-31728
7438	NEN 7438:1998 nl	Dierlijke mest en mestproducten - Bepaling van het gehalte aan ammoniumstikstof - Titrimetrische methode	www.nen.nl/nen-7438-1998-nl-35428

2.3.2 AMP-bepalingen

AMP betreft de hoeveelheid methaan die wordt geproduceerd door afbraak van organische stof in de opgeslagen mest op het moment van bemonstering (bij vergelijkbare in-situ temperatuur en zonder toegevoegd inoculum).

¹⁰ Vloeistoflagenmonsternemer - stangbediend, standaard | Royal Eijkkelkamp (geraadpleegd februari 2024).

¹¹ Voor een betere wereld / Home | LeAF BV, Wageningen (leaf-wageningen.nl).

Theoretisch geven AMP-analyses meer informatie over de methaanemissie dan de tot nu toe gebruikelijke/bekende 'Biochemical Methane Potential' (BMP) analyses. BMP-bepaling betreft het meten van de hoeveelheid methaan die potentieel uit de organische stof in de opgeslagen mest, op het monstertijdstip, kan worden gevormd.

Voor de bepaling van AMP moet de temperatuur tijdens monsternamen zo veel mogelijk behouden blijven tijdens transport. Zoals eerder vermeld, werden de monsters verzameld in de ochtend van de meetdagen en binnen enkele uren in thermoskannen afgeleverd bij het LeAF-laboratorium, samen met de exacte opname/gewenste mest-/testtemperatuur. Voor dit onderzoek streefde LeAF ernaar om het verschil tussen de gewenste en werkelijke test temperatuur niet meer dan 1 à 2 °C te laten verschillen. Dit kwam omdat het temperatuurverschil tussen case- en control-mestkelder niet groot was. Hiervoor werden verschillende incubators gebruikt.

De AMP-bepaling werd uitgevoerd volgens het protocol dat WLR binnen het EU-project M4Models heeft ontwikkeld. Monsters werden voorafgaand aan de test niet gezeefd, tenzij er grove stukken in de mest aanwezig waren (bijvoorbeeld strooisel of ander stalmateriaal) en zeven nodig bleek om een representatief monster in te wegen. Alleen in dat geval werd de mest over een grove zeef gehaald. De droge stof en anorganische stofgehaltes werden dan van zowel het oorspronkelijke monster als van het gezeefde materiaal bepaald. De test werd ingezet met 4 replicaties, de eindmeting vond plaats op dag 7. De CH₄ bepaling was uitgevoerd door het Servicelaboratorium van WLR. Het protocol is bijgevoegd in Bijlage 2 (zie ook, Petersen et al., 2024), waarbij ook is aangegeven hoe de testopzet bij LeAF is geweest. Het LeAF protocol is in de loop van de tijd veranderd ten opzichte van het originele M4Models protocol. Deze wijzigingen zijn in overleg met WLR gemaakt.

VFA, pH en EC

De AMP test is inclusief een pH en EC ('Electric Conductivity', geleidbaarheid) analyse. Daarnaast werden de mestmonsters ook geanalyseerd op vluchtige vetzuren (VFA, C₂-C₅). Deze bepaling werd in duplo uitgevoerd.

3 Resultaten

3.1 Temperatuur

De volgende grafieken tonen het temperatuurverschil tussen de gekoelde en de niet-gekoelde mest. In de periodes dat het systeem, binnen de experimentele setting, naar wens functioneerde, werd een verschil van ongeveer 3,5 à 4 °C bereikt. Op basis van deze metingen werd een gemiddelde temperatuur van 10,3 °C in de gekoelde mestkelder bereikt – dit is als de temperaturen in de periode dat de koeling was uitgeschakeld niet worden meegerekend, zie *Tabel 3* en *Figuur 10*. Zoals uitgelegd in Paragraaf 2.1 werden thermometers geplaatst in de case- en control-mestkelders op 4 locaties en op twee hoogtes per locatie, namelijk op 10 cm en op 50 cm van de kelderbodem. De temperatuur die in de datalogger werd geregistreerd (elke 5 minuten) wordt hier gebruikt om de gegevens te analyseren. Om de verkregen resultaten in de grafieken te visualiseren, gebruiken we de daggemiddelden omdat deze duidelijker lijnen weergeven¹². De x-as toont het temperatuurverschil in de tijd tussen 1 januari en 7 december 2023¹³. Zoals eerder vermeld, werden er al testen uitgevoerd vóór 1 januari, waardoor toen al een 4,2 °C daggemiddelde temperatuurverschil tussen de gekoelde en niet-gekoelde mestkelders werd geregistreerd.



Figuur 10 Daggemiddeld temperatuurverschil (alle thermometers) tussen case (blauw) en control (oranje).

Deze resultaten worden gekenmerkt door het experimentele karakter van deze studie waarin een testprototype werd gebruikt in de praktijkomstandigheden van een melkveebedrijf. Wat betreft de temperatuurverschillen, kan het jaar van dit experiment worden verdeeld in 5 periodes, zie *Tabel 3*.

¹² In Bijlage 3 staan de grafiek gemaakt met alle data en weer met de daggemiddelden om het verschil te kunnen zien.

¹³ De grafiek geeft de temperatuurontwikkeling tot 19 december weer.

Tabel 3 Gemiddelde temperatuur (°C) case en control mest en verschil, in 5 periodes en totaal + de bijzonderheden van deze periodes.

Periode – 2023	Bijzonderheden	T-control	T-case	T-verschil Control-case
1 januari tot en met 23 februari	Op 24 februari verplaatste de veehouder mest tussen kelders, omdat hij dat moest doen en om te voldoen aan de wens van het onderzoek om een vergelijkbaar mestniveau te hebben tussen case-control.	12,5	8,9	3,6
24 februari tot en met 8 juni	In april werd een bezinksel-laag en ijsvorming in de mestcontainer aangetroffen. De circulatiepomp werkte niet naar wens, op 23 april werd deze vervangen en was het koelingssysteem 3 dagen uitgeschakeld. Sinds 8 mei werd de mest rechtstreeks uit de mestkelder gezogen en niet uit de leiding tussen de gekoelde kelder en de opslag onder sleufsilos buiten de stal. De veehouder gaf aan dat hij in deze periode moeite had met het mixen van de mest in de kelder.	12,1	9,8	2,3
9 juni tot en met 18 augustus	De mestcontainer is vrij van bezinksel en ijs. Op 18 augustus werd het koelingssysteem uitgeschakeld omdat er niet genoeg mest in de kelders was vanwege het weidegang - en mest uitrijden seizoen.	16,2	12,1	4,1
19 augustus tot en met 23 oktober	Het systeem stond uitgeschakeld. Het systeem werd weer op 23 oktober ingeschakeld.	16,0	15,5	0,5
24 oktober tot en met 7 december	Het systeem werd op 7 december definitief uitgeschakeld	14,0	10,3	3,7
Totaal 2023		14,0	11,3	2,7
Totaal 2023 excl. 19-08/23-10 (systeem uitgeschakeld)		13,5	10,3	3,2

Een aandachtspunt van dit mestkoelingssysteem is dat er tijdens het mestuitrijseizoen onvoldoende mest in de kelders aanwezig is, waardoor het systeem uitgeschakeld moet worden. Bij verdere ontwikkeling van dit systeem voor toepassing in mestkelders kan een diepere pompput worden overwogen om mestcirculatie mogelijk te maken – zie ook Hoofdstuk 5 voor andere ontwerp mogelijkheden.

3.1.1 Handmatige temperatuurmetingen

In Tabel 4 zijn de met de hand gemeten mesttemperaturen tijdens de meetdagen weergegeven. De metingen vonden plaats ter hoogte van de punten waar ook continu de temperatuur gemeten werd (zie Figuur 7). Voor zover beschikbaar werden de resultaten op de vier locaties gemiddeld, en met een kleurschaal verschillen in temperatuur tussen gekoelde en referentie mestkelder en over de tijd inzichtelijk gemaakt.

Op basis van deze metingen werd een gemiddeld verschil van 2,9 °C waargenomen, iets lager dan uit de continue metingen aangegeven. Daarbij was de afname in prestaties van het koelsysteem ook hier zichtbaar, wat na de gepleegde interventies weer tot (gedeeltelijke) verbetering leidde. Hierdoor werd de streef temperatuur van < 10 °C voor de gekoelde mest uiteindelijk niet gehaald, tevens was in beide kelders sprake van een seizoensinvloed op de mesttemperatuur.



Tabel 4 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 waardoor het systeem uit stond.

	Gekoeld									Gem.	Referentie									Gem.
	Opp.	-20 cm	-40 cm	-60 cm	-80 cm	-100 cm	-120 cm	-140 cm	Bodem		Opp.	-20 cm	-40 cm	-60 cm	-80 cm	-100 cm	-120 cm	-140 cm	Bodem	
1-2-2023	9,4	8,9	8,5	8,5	8,5	7,4	8,8		7,4	8,4	12,5	15,3	15,0	14,4	14,1	13,9	13,7		13,6	14,1
22-3-2023	12,4	11,6	10,7	10,5	10,6				10,3	11,0	13,8	13,9	13,2	12,8	12,7	12,6			12,6	13,1
3-5-2023	11,1	10,7	10,3	10,4					10,5	10,6	11,2	11,6	11,9	11,5					11,8	11,6
14-6-2023	13,5	12,2	12,1	11,9					11,8	12,3	16,3	14,4	13,6						13,9	14,5
19-7-2023	15,3	14,0	12,8	12,7					12,6	13,5	17,7	17,5	16,7	16,6					16,4	17,0
29-11-2023	10,2	11,4	11,2	11,2	11,1	10,6			10,9	10,9	11,9	12,4	13,0	13,3	13,5	13,5	13,6		13,7	13,1
Gem.	12,0	11,5	10,9	10,8	10,1	9,0	8,8		10,6	10,9*	13,9	14,2	13,9	13,7	13,4	13,3	13,7		13,7	13,8*

* Gemiddelde gebaseerd op alle gegevens.

Tijdens de zomermaanden was er onvoldoende mest in de kelder aanwezig om het koelsysteem te kunnen laten draaien. Meetdagen in deze periode (op 27-09-2023 en 18-10-2023) werden benut om de vergelijkbaarheid van case en control vast te stellen. De gemiddelde mesttemperatuur in de te koelen kelder was op deze dagen respectievelijk 0,4 °C lager en 0,3 °C hoger waarmee van een structureel verschil tussen beide geen sprake lijkt te zijn – zie Bijlage 1 en Bijlage 4.

3.1.2 Omgevingstemperatuur

Met een gemiddelde temperatuur van 11,8 °C was 2023 het warmste jaar sinds het begin van de KNMI-metingen in Nederland in 1901¹⁴. Ter illustratie was in de nacht van 1 januari een recordtemperatuur van 16,9 °C gehaald, en normaal is de temperatuur in juni gemiddeld 16,2 °C en bereikte die met 19,4 °C een recordtemperatuur sinds 1901. De herfst was ook zeer zacht (normaal 10,9 °C, 2023 12,8 °C). Ook het aantal zonuren was hoog volgens het KNMI. Op het weerstation Nieuw Beerta dat in de buurt van Hellum staat, was de gemiddelde jaartemperatuur 0,9 °C hoger (zie *Tabel 5*) dan het gemiddelde gemeten in Nederland.

Tabel 5 *Maandgemiddelde temperatuur (°C) KNMI-weerstation Nieuw Beerta, normaal en tijdens de maanden van dit onderzoek.*

Maand	Normaal	2023
Januari	2,5	5,2
Februari	2,8	5,0
Maart	5,3	6,1
April	8,9	7,8
Mei	12,4	12,1
Juni	15,2	17,6
Juli	17,5	17,5
Augustus	17,5	17,3
September	14,4	17,4
Oktober	10,2	12,3
November	6,2	6,9
December	3,3	5,6
Gemiddeld	9,7	10,9

Deze weeromstandigheden hebben invloed op de temperatuur van de opgeslagen mest in veehouderijbedrijven en dus op de methaanemissie uit deze opslagen. Het externe mestkoelingsprototype kon, bij correcte werking, de temperatuur van de opgeslagen mest met ongeveer 4 °C verlagen. Het temperatuurprofiel in de case-kelder volgde echter duidelijk de omgevingstemperatuur, parallel aan, maar lager dan, het temperatuurprofiel in de control-kelder. Hierdoor, in combinatie met het bijna constant toevoegen van warme verse mest ($\approx 38,5$ °C) zal het met dit mestkoelsysteem moeilijk zijn om het systeem zodanig in te regelen dat de opgeslagen mest altijd onder 10 °C blijft.

3.2 Emissiemetingen

Resultaten van de paraplumetingen zijn cijfermatig samengevat in *Tabel 6*. Op de meeste meetdagen zijn acht waarnemingen in zowel referentie als gekoelde mestkelder gedaan waarvan hier de mediaan wordt weergegeven. Voor de methaanemissie wordt dit ook visueel gepresenteerd in *Figuur 11*. 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 4* tevens boxplots voor de emissie van ammoniak en lachgas opgenomen.

¹⁴ KNMI - Jaar 2023 (geraadpleegd september 2024).

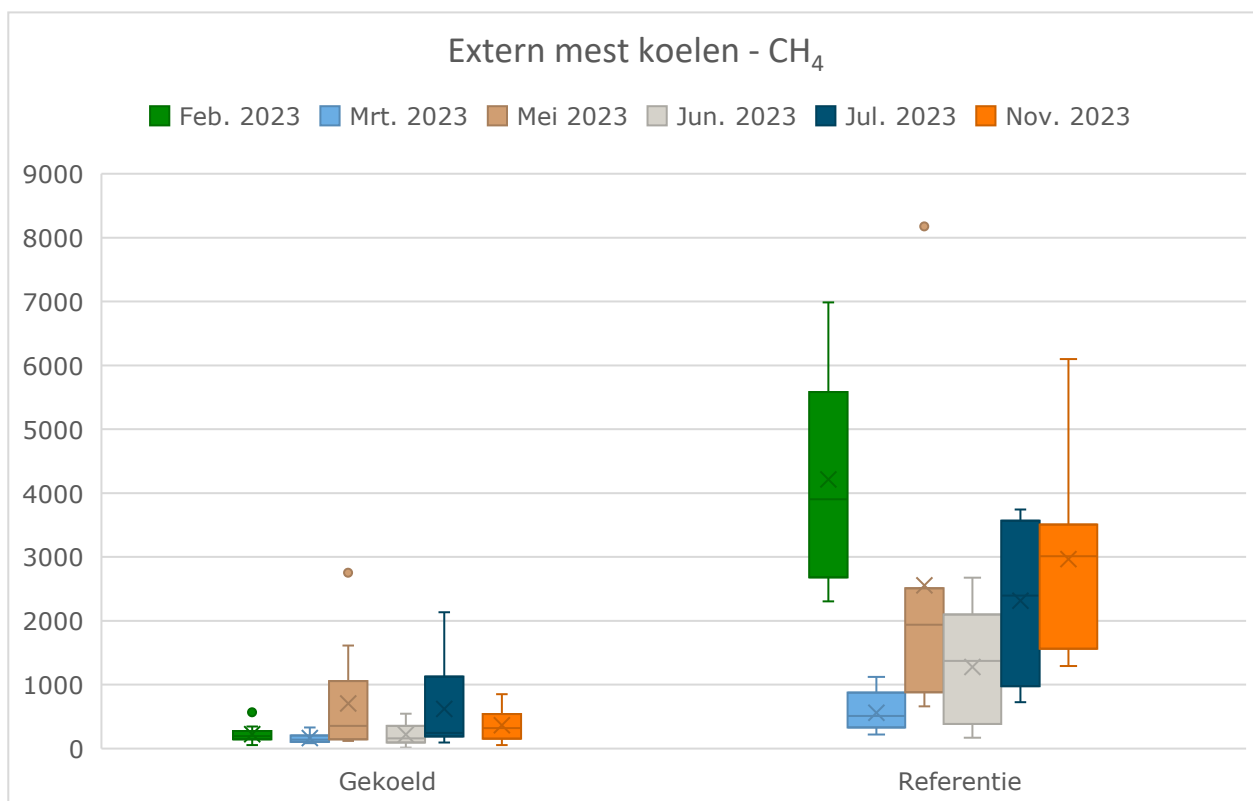
Tabel 6 Samenvatting van emissies (medianen in mg/m²/u) uit mest en het verschil (%) tussen control (niet gekoeld) en case (koeling) voor CH₄, NH₃ en N₂O, inclusief de rekenkundig gemiddelden over alle meetdagen heen.

Datum	CH ₄ control (mg/m ² /u)	CH ₄ case (mg/m ² /u)	Vershil CH ₄	NH ₃ control (mg/m ² /u)	NH ₃ case (mg/m ² /u)	Vershil NH ₃	N ₂ O control (mg/m ² /u)	N ₂ O case (mg/m ² /u)	Vershil N ₂ O
01-02-2023	3904	193	-95%	1,0	2,5	150%	0,03	0,10	224%
22-03-2023	424	135	-68%	1,8	4,7	154%	0,05	0,06	16%
03-05-2023	2112	286	-86%	6,6	11,8	78%	0,01	0,06	583%
14-06-2023	959	150	-84%	12,0	5,7	-52%	0,08	0,08	-6%
19-07-2023	2053	231	-89%	1219 ^a	574 ^a	-53%	0,19	0,45	140%
29-11-2023	2537	294	-88%	1,7	2,5	52%	0,05	0,12	116%
Gem. ± SD	1998 ± 1225	215 ± 67	-89%*	4,6 ± 4,7	5,4 ± 3,8	18%	0,07 ± 0,06	0,14 ± 0,15	107%**

^a Uitbijter, niet meegenomen in bepaling van het gemiddelde.

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

** zwak significant (p < 0,10) verschil tussen case en control, op basis van een eenzijdige t-test.



Figuur 11 Boxplot van metingen aan wel en niet gekoelde drijfmest. Y-as emissies in mg/m²/u CH₄. Per meetdag en behandeling geven de horizontale lijnen een vijf-getallensamenvatting: van onder naar boven minimum, eerste kwartiel, mediaan, derde kwartiel en maximum. De box zelf omvat dus 50% van de waarden en kruisjes zijn het gemiddelde, de bolletjes uitbijters. NB zowel de gekoelde als referentie mestkelder werden tweemaal daags gedurende tien minuten gemixt.

De metingen lieten consequent een lagere methaanemissie bij de gekoelde kelder zien. Gemiddeld over de zes meetdagen bedroeg de reductie 89% ($P = 0,01$) (control: $1.998 \pm 1.225 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2/\text{u}$ <-> case $215 \pm 67 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2/\text{u}$). In de zomer was zoals eerder vermeld, te weinig mest in de kelder aanwezig om het systeem te kunnen laten functioneren. Meetdagen in deze periode werden benut om vast te stellen of er in de basis verschil tussen case en control bestond. Op beide dagen was de emissie uit de te koelen kelder hoger dan die van de control (respectievelijk 37% en 44%). Dit verschil kan bijvoorbeeld te maken hebben met de oriëntatie van de kelders waardoor instraling verschilt maar uit de waargenomen mesttemperaturen blijkt dit niet direct (Paragraaf 3.1). Met een maximale mediane waarde van $1070 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2/\text{u}$ lag de emissie op deze dagen niet erg hoog waardoor mede gezien de grote variatie, een toeval-fout niet uitgesloten kan worden.

Ten aanzien van de ammoniakemissie zijn er wisselende resultaten, soms positief en soms negatief. Gemiddeld werd een 18% (control: $4,6 \pm 4,7 \text{ mg NH}_3/\text{m}^2/\text{u}$ <-> case: $5,4 \pm 3,8 \text{ mg NH}_3/\text{m}^2/\text{u}$) hogere ammoniakemissie in de gekoelde mestkelder waargenomen, maar dit bij in verhouding tot eerdere rapportages over mest koelen 1.0 en 2.0 (+ 1.0) relatief lage niveaus en verschil was ook niet statistisch significant. Tijdens de meetdag op 19 juli worden hoge emissies gemeten, waarvoor geen verklaring is gevonden. Technisch gezien is er geen reden de metingen niet mee te nemen in de rapportage, echter vermoedelijk vonden die dag of kort ervoor handelingen zoals overpompen van mest plaats waardoor de situatie voor NH_3 niet representatief was. Daarom zijn deze waarden in de berekening van het gemiddelde buiten beschouwing gelaten. Verder werd in beide kelders hetzelfde mestmix-regime toegepast. In de gekoelde mestkelder vond een extra mestcirculatie/beweging plaats door opgeslagen mest in de koelingscontainer te zuigen en de gekoelde mest terug te voeren naar de mestkelder. Het is onduidelijk of dit een verklarende factor kan zijn.

Voor lachgas werd een zwak significant ($P = 0,06$) verschil gevonden, waarbij de emissie in de gekoelde situatie gemiddeld 107% hoger was (control: $0,07 \pm 0,06 \text{ mg N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{u}$ <-> case: $0,14 \pm 0,15 \text{ mg N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{u}$). In eerdere rapportages omtrent mest koelen (Puente-Rodríguez et al., 2023; 2024) werd voor N_2O eveneens een zwak significant verschil geconstateerd waarbij de gekoelde kelder hoger dan wel lager uitkwam. Dit wisselende beeld vindt zijn oorzaak in de veelal lage emissies echter met zo hier en daar 'hotspots' waar kennelijk (de-)nitrificatie optreedt. Eén of enkele van dit soort metingen beïnvloeden de uiteindelijke uitkomsten sterk.

3.3 Analyse mestmonsters

3.3.1 Standaard mestanalyse

Analyseresultaten van de mestmonsters genomen uit de referentie en gekoelde kelders tijdens de meetdagen staan weergegeven in *Tabel 7*. Op de meetdagen (27-09-2023 en 18-10-2023) waarop de koeling uitstond zijn ook monsters genomen en geanalyseerd, echter deze resultaten zijn in de tabel achterwege gelaten – zie Bijlage 4.

Tabel 7 Analyseresultaten mestmonsters. Resultaten van meetdagen waarop de koeling uitstond worden niet getoond.

Datum	Monster	Totaal-N	Ammonium-N	P	K	Droge stof	OS (ds-as)	pH
01-02-2023	Gekoeld	3,15	1,33	0,50	3,61	75,0	59,3	7,17
	Referentie	3,67	1,43	0,53	4,04	84,4	61,8	7,32
22-03-2023	Gekoeld	3,29	1,24	0,52	3,65	95,5	66,1	7,27
	Referentie	3,35	1,25	0,58	3,88	107,4	70,3	7,15
03-05-2023	Gekoeld	3,35	1,27	0,56	3,63	88,6	63,5	7,27
	Referentie	3,35	1,35	0,51	3,81	75,5	56,6	7,36
14-06-2023	Gekoeld	2,04	0,77	0,33	2,62	50,2	38,3	7,42
	Referentie	2,26	0,94	0,40	3,01	71,2	45,8	7,16
19-07-2023	Gekoeld	2,03	0,80	0,35	2,61	57,0	44,4	7,38
	Referentie	2,62	1,13	0,45	3,26	75,5	48,4	7,23
29-11-2023	Gekoeld	3,26	1,20	0,63	3,67	113,7	69,4	7,51
	Referentie	2,46	1,13	0,41	3,53	54,8	41,4	7,40
Gem. ± SD	Gekoeld	2,85 ± 0,64	1,10 ± 0,25**	0,48 ± 0,12	3,30 ± 0,53*	80,0 ± 24,1	56,8 ± 12,6	7,34 ± 0,12
	Referentie	2,95 ± 0,58	1,20 ± 0,18**	0,48 ± 0,07	3,59 ± 0,39*	78,1 ± 17,3	54,0 ± 10,8	7,27 ± 0,11

* Significant ($p < 0,05$) en ** zwak significant ($p < 0,10$) verschil tussen case en control, op basis van een eenzijdige t-test.

Voor kalium is een significant verschil ($P = 0,02$) gevonden tussen de referentie en gekoelde mest, het is niet duidelijk waardoor dit komt. Daarnaast worden alleen bij ammonium-N aanwijzingen tot een verschil gevonden ($P = 0,06$), zodat verondersteld kan worden dat mestsamenstelling tussen beide kelders niet al te sterk verschilde. Wel trad rond de zomer een waterlekkage van een drinkbak boven de gekoelde kelder op, dit zou het lagere ds-gehalte in de monsters van 14-06-2023 en 19-07-2023 kunnen verklaren. Op 29-11-2023 is het dan juist weer relatief hoog, wat kan komen door zand in het monster. Het bedrijf heeft eerder problemen ondervonden met bezinklagen in de mestkelders.

3.3.2 AMP-bepaling

Op vijf van de zes meetdagen werden monsters genomen voor het bepalen van de Actuele Methaan Productie (AMP). Dit gebeurde ook op één van de meetdagen waarop het koelsysteem uitstond. Rond de twee resterende meetdagen had het analyserend lab geen capaciteit om de analyse te kunnen uitvoeren. Tabel 7 geeft een overzicht van de belangrijkste resultaten.

Tabel 8 Resultaten AMP-bepalingen op referentie en gekoelde drijfmest.

Datum	Monster	ds	OS	% OS in	Testperiode		CH ₄ prod.snelh. (g CH ₄ /kg OS- monster/d)	ppm CH ₄ in buis
		(g/kg)	(g/kg)	ds	uur	dag		
22-03-2023	Gekoeld	78	61	78%	164	6,82	0,12	10600
	Referentie	100	69	69%	165	6,87	0,19	18936
03-05-2023	Gekoeld	78	55	71%	165	6,89	0,12	9344
	Referentie	77	55	71%	166	6,93	0,13	11056
14-06-2023	Gekoeld	54	42	77%	168	6,99	0,19	12082
	Referentie	57	43	75%	166	6,92	0,54	28605
20-07-2023	Gekoeld	51	39	77%	166	6,93	0,15	9774
	Referentie	70	50	71%	165	6,87	0,50	37423
29-11-2023	Gekoeld	95	64	68%	166	6,91	0,13	11968
	Referentie	52	39	76%	167	6,95	0,45	25103
Gem.	Gekoeld	71 ± 19	52 ± 11	74 ± 5%	166 ± 1,5	6,91 ± 0,06	0,14 ± 0,03*	10754 ± 1246*
	Referentie	71 ± 19	51 ± 12	72 ± 3%	166 ± 0,9	6,91 ± 0,04	0,36 ± 0,19*	24225 ± 9944*

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

Toetsing van de gevonden CH₄ productiesnelheden (en uiteindelijke ppm's CH₄ in de testbuizen) laat een significant verschil (P = 0,02) zien tussen de gekoelde en referentie mestmonsters. Dit bevestigt de uitkomsten van de emissiemetingen dat uit de gekoelde mest lagere methaanemissies optreden. Het totaal aan en de vluchtige vetzuren afzonderlijk (C2-C5; resultaten hier niet getoond), wijken daarbij onderling niet van elkaar af.

3.4 Elektriciteitsverbruik

Op basis van de gegevens uit de slimme meter van de melkveehouder volgt hier een overzicht van het elektriciteitsverbruik tijdens het experiment. De emissiemetreeks werd uitgevoerd tussen 1 februari en 29 november 2023. Het koelingssysteem is na de laatste test op 7 december 2023 uitgeschakeld. Voor de volledigheid is hier het elektraverbruik van het systeem tussen 1 januari en 7 december 2023 weergegeven. Zoals eerder vermeld is het systeem uitgeschakeld tussen 18 augustus en 23 oktober. Tabel 9 geeft een overzicht van het elektriciteitsverbruik van het externe mestkoelingssysteem per kwartaal en per onderdeel en Tabel 10 van het totaal verbruikte in 2023, het jaar van deze studie. Deze tabellen geven ook inzicht in het aandeel van het verbruik per apparaat/onderdeel ten opzichte van het totale energieverbruik van het systeem.

Tabel 9 Elektriciteitsverbruik per kwartaal gedurende het jaar van het experiment. Per onderdeel van het mestkoelingssysteem, het aantal kWh totaal en per dag en het percentage van het totale verbruik van het onderdeel ten opzichte van het totaal.

Elektraverbruik 1e kwartaal 2023 01-01 / 31-03 = 90 dagen				Elektraverbruik 2e kwartaal 2023 01-04 / 31-06 = 91 dagen			
	kWh	kWh per dag	% van totaal		kWh	kWh per dag	% van totaal
Warmtepomp	7.782	86	43,9	Warmtepomp	13.234	145	42,1
Droogkoeler	393	4	2,2	Droogkoeler	1.309	14	4,2
Mestpompinstallatie*	8.219	91	46,4	Mestpompinstallatie*	6.367	70	20,3
Circulatiepomp				Circulatiepomp	9.464	104	30,1
Overig**	432	5	2,4	Overig**	104	1	0,3
Mixer koeling	897	10	5,1	Mixer koeling	941	10	3,0
Totaal	17.722	197	100	Totaal	31.419	345	100

Elektraverbruik 3e kwartaal 2023 01-07 / 31-9 = 49 dagen				Elektraverbruik 4e kwartaal 2023 01-10 / 07-12 = 46 dagen			
	kWh	kWh per dag	% van totaal		kWh	kWh per dag	% van totaal
Warmtepomp	9.990	204	44,1	Warmtepomp	6.851	149	40,7
Droogkoeler	1.057	22	4,7	Droogkoeler	519	11	3,1
Mestpompinstallatie*	3.716	76	16,4	Mestpompinstallatie*	3.524	77	20,9
Circulatiepomp	7.392	151	32,6	Circulatiepomp	5.309	115	31,5
Overig**	76	2	0,3	Overig**	53	1	0,3
Mixer koeling	433	9	1,9	Mixer koeling	572	12	3,4
Totaal	22.664	463	100	Totaal	16.828	365	100

* Mestpompinstallatie = mestpomp + snijder + besturingskast.

** Andere pompen en elementen van het mestkoelingssysteem. In het eerste kwartaal was dit inclusief circulatiepomp.

Tabel 10 Elektriciteitsverbruik van het mestkoelingssysteem gedurende het jaar van het experiment. Per onderdeel van het mestkoelingssysteem het aantal kWh totaal en per dag en het percentage van het totale verbruik van het onderdeel ten opzichte van het totaal.

Elektraverbruik 2023 01-01 / 08-12 = 276 dagen			
	kWh	kWh per dag	% van totaal
Warmtepomp	37.857	137	42,7
Droogkoeler	3.227	12	3,7
Mestpompinstallatie	21.826	79	24,6
Circulatiepomp	22.165	80	25,0
Overig	665	2	0,8
Mixer koeling	2.843	10	3,2
Totaal*	88.633	321	100

Totaal gecorrigeerd 58.555 kWh, zie argumenten hieronder.

Om een temperatuurverschil van 3,5 tot 4 °C en een methaanemissiereductie van 85% tussen gekoelde en niet-gekoelde mest te realiseren, verbruikte het systeem 88.633 kWh gedurende 276 dagen. De gekoelde mestkelder heeft een capaciteit van ongeveer 600 m³.

De afspraak met de veehouder was om te proberen het mestvolume tussen de twee kelders vergelijkbaar te houden, maar hij was vrij om zijn dagelijkse werkzaamheden uit te voeren, met andere woorden het doel van het project was om het effect van (extern) mestkoeling op de methaanproductie te testen in praktijkomstandigheden zonder enige verstoring van het project op de bedrijfsvoering. We werden (vaak) geïnformeerd als er iets gebeurde in het mestmanagement, hoewel dit moeilijk vol te houden was tijdens het hectische groeiseizoen. Hierdoor is het onmogelijk om te zeggen hoeveel mest er is gekoeld. In ieder geval is dit uiteraard veel te veel elektriciteitsvraag om het systeem met deze onderdelen in de melkveehouderij te implementeren. Dit komt deels door keuzes die zijn gemaakt in de context van de uitvoering van onderzoek.

Voor het maken van dit prototype werden in het kader van het uitvoeren van onderzoek een aantal keuzes gemaakt die, als deze keuzes met de kennis van nu gemaakt zouden moeten worden, het energieverbruik van *extern koelen* lager zouden kunnen maken. De meeste onderdelen waren gedimensioneerd voor onderzoeksdoeleinden. Zo had de mestpomp een capaciteit van 40 m³/uur, om ervoor te zorgen dat als de mestkelder leeggehaald moest worden voor de uitvoering van het onderzoek (denk aan het vervangen van een temperatuursensor, etc.), dit snel zou gebeuren.

Wat de resultaten betreft, valt het extreem hoge energieverbruik van de nieuwe circulatiepomp (Pomp Pedrollo 2CP 32/200C) die op 23 april is geïnstalleerd op. Hoewel deze pomp maar 3 kwartalen heeft gewerkt, verbruikte hij 25% van de totale kWh die het systeem in het jaar van het experiment gebruikte, zie *Tabel 10*. Hoewel het aandeel van de circulatiepomp in normale koelingsinstallaties rond de 3 tot 4% van het totaal ligt (koelinstallatiespecialist, persoonlijke communicatie november 2024). In het eerste kwartaal bedroeg het energieverbruik van alle andere elektrische onderdelen, inclusief de circulatiepomp, die niet in *Tabel 9* en *Tabel 10* staan vermeld, slechts 432 kWh, oftewel 2,4% van de totale kWh in dat kwartaal. De nieuwe circulatiepomp gebruikte in het tweede kwartaal 9.464 (> 30% van totaal), in het derde 7.392 (> 32%) en in het vierde kwartaal 5.309 kWh (31,5%). Circulatiepompen worden steeds efficiënter en ze moduleren automatisch met het systeem mee. De nieuwe pomp kon dat niet en blijft altijd op maximale snelheid draaien (waardoor er ook altijd meer weerstaand ontstaat). Dit model wordt ook als irrigatiepomp verkocht. De koelinstallatiespecialist wilde een krachtigere circulatiepomp om de algehele prestaties van het systeem te verbeteren met als resultaat voldoende circulatie, maar wel een onnodig hoog energieverbruik. Met deze kennis kunnen we concluderen dat de oude circulatiepomp goed genoeg was en het probleem waarschijnlijker eerder aan ijsvorming en de bezinsel laag lag dan de circulatiecapaciteit.

Opvallend is ook de hoogte van het elektriciteitsgebruik van de mestpomp ten opzichte van de andere onderdelen van het systeem. In het eerste kwartaal was dit verbruik zelfs hoger dan dat van de warmtepomp; er werd gekeken naar effecten op maximale rondpompsnelheid en de betrokkenen moesten leren hoe de pomp moest worden afgesteld. In de andere kwartalen gebruikte de mestpomp circa 25% van de totale elektriciteit van het mestkoelingssysteem (zie *Tabel 10*). Bij het ontwerpproces van dit extern koelingssysteem is geprobeerd om geen onderdelen in de mestkelder te plaatsen. Systemen onder de roostervloer zijn ingewikkeld om te repareren/vervangen en zijn daarom niet populair bij veehouders en monteurs. Daarom is gekozen voor een verdringerpomp, dit type pompen is zelfaanzuigend en maakt het mogelijk om de mest uit de kelder te zuigen en naar de mestcontainer te pompen. Dit proces vereist energie, bijvoorbeeld meer dan een pomp die in de mest in de kelder kan worden geplaatst. Het is algemeen bekend dat pompompen met dezelfde of meer capaciteit de helft minder energie verbruiken. Zo heeft de mestpomp van dit experiment in Helleum een elektrisch vermogen van 10,5 kW en een capaciteit van 40 m³/uur, terwijl de pomp die bij de eerste proef met extern koelen in Huilerwijk werd gebruikt, een elektrisch vermogen van 7,5 kW en een capaciteit van 160 m³/uur had.

Deze studie heeft aangetoond dat het mogelijk is om de methaanemissies uit mest in praktijkomstandigheden aanzienlijk te reduceren. Een vervolgstap is om nauwgezet te kijken naar de behoeften van het koelingssysteem in termen van capaciteit, snelheid, temperatuurbehoeftes, etc. om vervolgens alle onderdelen van het systeem beter te dimensioneren en aan te passen naar die behoeften. Met een paar eenvoudige keuzes kan het energieverbruik worden gehalveerd ten opzichte van het geteste prototype. Een gewone circulatiepomp zou bijvoorbeeld hooguit 3.000 kWh (slechtste scenario) in het jaar hebben gebruikt. Dan zou het totaal van 88.633 kWh teruggebracht kunnen worden naar 69.468. En als een pomp 50% minder kan gebruiken dan het huidige mestpompsysteem dan zou het totale systeem 58.555 kWh in een verder vergelijkbare experimentele setting kunnen hebben gebruikt.

Op basis van deze resultaten kan ook geconcludeerd worden dat automatisering van een dergelijk systeem belangrijk is om te zorgen dat alle onderdelen goed met elkaar werken en dat zo'n geautomatiseerd systeem in staat is om factoren zoals mesttemperatuur, het effect van omgevingstemperaturen, mesthoogte en/of de aan/afwezigheid van melkkoeien te detecteren en zo de energieprestatie van het systeem te optimaliseren.

4 Mest koelingssystemen vergelijking – 1.0, 2.0 & Extern mest koelen

Het in dit rapport geanalyseerde experiment is het derde en voorlopig laatste dat WLR heeft uitgevoerd met mestkoeling om de methaanemissie uit mest te reduceren. In deze paragraaf worden de met de geteste prototypes behaalde resultaten vergeleken. Er moet rekening worden gehouden met verschillende factoren, bijvoorbeeld dat de omgevingstemperaturen variëren tussen de jaren waarin de prototypes zijn getest, of dat de meetmethode soms anders is. Voor de ins en outs van de verschillende experimenten wordt verwezen naar de eerdere rapporten (Puente-Rodríguez et al., 2023; 2024).

Tabel 11 Gemiddelde temperatuur (°C) van gekoelde en niet-gekoelde mestkelders tijdens de experimenten met de prototypes.

	T-Case	T-Control	Verschil
Mest koelen 1.0*	11,5 °C	13,8 °C	2,3 °C
Mest koelen 1.0 + 2.0**	9,3 °C	13,1 °C	3,8 °C
Extern mest koelen***	10,3 °C	13,5 °C	3,2 °C

* Handmatig uitgevoerd op verschillende plekken en hoogtes tijdens de emissiemeetdagen.
** Handmatig uitgevoerd op verschillende plekken en hoogten tijdens de emissiemeetdagen. 1.0 was circa 238 dagen ingeschakeld.
*** 24/7 metingen op 4 plekken en 2 dieptes per plek. Tussen 19 augustus tot en met 23 oktober was het mestkoelingssysteem uitgeschakeld en was de temperatuur van case- en control-kelder vergelijkbaar (hoog). Deze periode is hier niet meegenomen.

Tabel 12 Bereikte emissiereductie (%) met de prototypes tussen gekoelde en niet-gekoelde mestkelders.

	Methaanemissie	Ammoniakemissie	Lachgas
Mest koelen 1.0	-45%	75%	46%
Mest koelen 1.0 + 2.0	-69%	-9%	-52%
Extern mest koelen	-89%	18%	107%

Tabel 13 Energieverbruik van de koelingssystemen (alle onderdelen).

	Energieverbruik
Mest koelen 1.0	9.238 kWh
Mest koelen 1.0 + 2.0	27.226 kWh
Extern mest koelen*	58.555 kWh

* Gecorrigeerd, zie Paragraaf 3.4.

Tabel 14 Schatting van het mitigatiepotentieel/energiebalans van de drie prototypes.

	Energieverbruik kg CO ₂ -eq*	CH ₄ - reductie kg CO ₂ -eq**	Warmteproductie kg CO ₂ -eq***	Totaal reductie kg CO ₂ -eq****
Mest koelen 1.0	2.032	-25.049	-5.504	-28.522
Mest koelen 1.0 + 2.0	5.990	-38.409	-19.571	-51.990
Extern mest koelen	12.882	-49.542	-41.589	-78.249

*Aanname: 1 kWh = 0,22 kg CO₂-eq in 2023 [Rendementen en CO₂-emissie van elektriciteitsproductie in Nederland, update 2023 | CBS](#) (geraadpleegd juli 2025).

**Aannames:

- Het uitgangspunt van deze experimenten was om de bedrijfsvoering van dit melkveebedrijf niet te verstoren. De veehouder verplaatste regelmatig koude mest naar andere mestopslagen op het melkveebedrijf (behalve in de referentiemestkelder). Gekoelde mestkelder + mestcontainer ≈ 640 m³ drijfmest. Mestproductie per koe 12,1 m³ per 7 maanden (RVO 2025¹⁵) ≈ de mest van 53 melkkoeien werd gekoeld.
- 1 melkkoe = 37,51 kg CH₄ uit de mest per jaar (Ruyssenaars et al., 2022; Van der Net et al., 2025).
- De uitstoot van 1 kilogram methaan staat gelijk aan 28 kilogram CO₂-equivalent (IPCC, Van der Net et al., 2025).

***Aannames

- Schatting warmteproductie:
 - Mest koelen 1.0 = 90 GJ = 25.020 kWh (= 2.700 m³ aardgas).
 - Mest koelen 1.0 + 2.0 = 320 GJ = 88.960 kWh (= 9.600 m³ aardgas).
 - Extern mest koelen = 680 GJ = 189.040 kWh (= 20.400 m³ aardgas).
- 1 gigajoule (GJ) = (30 m³ aardgas =) 278 kWh elektriciteit (= 24 liter motorbenzine) – Bron, CBS 2025.
- 1 kWh = 0,22 kg CO₂-eq.

**** Energieverbruik kg CO₂-eq - Methaanreductie kg CO₂-eq - Warmteproductie kg CO₂-eq = Totaal reductie kg CO₂-eq

De resultaten met deze drie prototypes bevestigen de verwachting ('proof of principle' en 'proof of concept') dat het onder praktijkomstandigheden mogelijk is om de methaanemissie uit melkveedrijfmest fors te reduceren door de temperatuur van de mest te verlagen (Tabel 12).

Het externe mestkoelingssysteem presteert het beste op het gebied van methaanemissiereductie, met een gemiddelde emissiereductie van 89%. Dit is bereikt in een experimentele setting in praktijkomstandigheden. Dit suggereert dat een methaanemissiereductie van 90-100 % technisch haalbaar zou moeten zijn.

Het mestkoelingssysteem 1.0 + 2.0 is wel interessanter wanneer het temperatuurverschil in combinatie met de energie-input wordt beschouwd. Ook wanneer rekening wordt gehouden met het feit dat de methaanemissie met het extern koelingssysteem vergelijkbaar wordt met die van 1.0 + 2.0 wanneer de resultaten van de referentiemetingen ook worden meegenomen toen het systeem was uitgeschakeld, wordt dit systeem interessanter – namelijk een reductie met extern van 54% tussen case en control, zie Bijlage 4. Echter werd deze combinatie problematisch in deze uitvoering vanwege de korst- en ijsvorming.

De methaanemissiereductie was hoger met het extern systeem dan met 1.0 + 2.0, hoewel met het laatste systeem een lagere mesttemperatuur bereikt werd. Een vraag hierbij is of, na ruim drie jaar verlaging van de mesttemperatuur in de case-kelder, de populatie methanogenen (in het inoculum) in deze kelder is veranderd, waardoor er minder methaan wordt geproduceerd (zie Dalby et al., 2021 voor een analyse van de relatie tussen methanogenen en temperatuur). De resultaten van de case/control vergelijkingsmetingen met het koelsysteem uitgeschakeld spreken deze mogelijkheid tegen, zie Bijlage 1. Uiteraard wordt bij de gemiddelde methaanemissiereductie met het extern koelingssysteem geen rekening gehouden met de zomerperiode waarin het systeem was uitgeschakeld omdat onvoldoende mest in de kelder aanwezig was.

Een andere relevante vraag is het elektriciteitsverbruik (Tabel 13 en Paragraaf 3.4). Dit onderzoek betreft de eerste prototypes. Uiteraard is aanvullend onderzoek nodig om de koelingssystemen te optimaliseren, zowel qua ontwerp, componenten als automatiseren, en om slim gebruik te maken van elektriciteit uit zon en wind.

¹⁵ [Tabel 6 Stikstof en fosfaat per melkkoe](#) (geraadpleegd september 2025).

Vanwege het experimentele karakter van de testen en het doel om de bedrijfsvoering van dit melkveebedrijf niet te verstoren, is het moeilijk om een echte vergelijking en evaluatie van de emissie en energiebalans van deze prototypes uit te voeren. Een poging daartoe wordt gedaan in Tabel 14. Zodra bepaalde prototypes zijn geselecteerd, kan een optimalisatieproces beginnen. Op dat moment moet de energie-input uiteraard worden vergeleken met onder andere de methaanemissiereductie, warmteterugwinning, lachgasemissie en CO₂-voetafdruk van alle onderdelen van deze systemen. Er wordt veel restwarmte geproduceerd en melkveehouders kunnen moeilijk alle geproduceerde warmte in de bedrijfswoning benutten. Om de rentabiliteit en BKG-mitigatie potentieel te maximaliseren is het belangrijk om de ontwikkeling van mestkoelingssystemen te koppelen aan de ontwikkeling van functies zoals het verwarmen van gebouwen, het drogen van gras en van mest, etc.

Voor ammoniak en lachgas is de combinatie 1.0 + 2.0 ook interessant. De variatie in de emissiemetingen voor deze combinatie (en de andere prototypes) is echter te groot om een goed beeld te geven. Het feit dat deze combinatie ook het oppervlak van de mest koelde, zou hierbij een rol kunnen hebben gespeeld. Om ervoor te zorgen dat de resultaten van de verlaging van de mesttemperatuur zichtbaar waren, werd in deze experimenten gekozen voor een gelijk mestmix-regime in de gekoelde en niet gekoelde mestkelders, maar bij extern koelen vond er echter een extra mestbeweging plaats door de werking van het systeem.

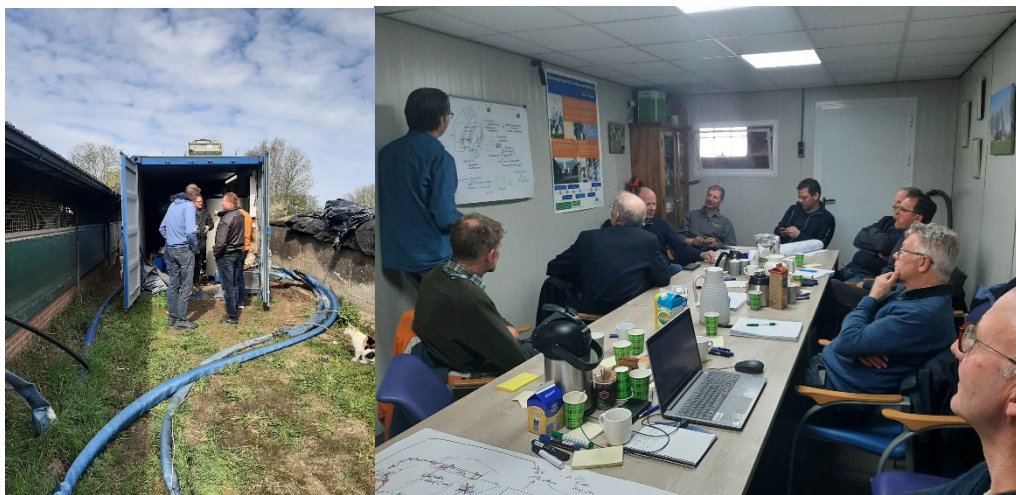
Het uitgangspunt van de projecten waarin deze prototypes werden getest, was het koelen van mest in bestaande stallen met een traditionele roostervloer en mestkelder. Voordat de implementatie kan worden overwogen, moet een doorontwikkelingstraject plaatsvinden. Het advies is om niet alleen te focussen op methaanemissies, maar ook op de emissies van ammoniak en lachgas. Ideeën die te maken hebben met het benutten van de relatief lage temperaturen buiten de stallen in combinatie met extern mestopslagen, vormen interessante ontwerprichtingen – zie volgend Hoofdstuk.

5 Mest koelen in combinatie met?

Het doel van de projecten, waarin de drie prototypes voor mestkoeling werden getest, was de ontwikkeling van technologieën om de methaanemissie uit opgeslagen mest in bestaande melkveestallen met traditionele roostervloer en mestkelders sterk te verminderen. Deze doelstelling is bepalend voor de uitvoering van deze mestkoelingssystemen. Vanwege de goede resultaten die zijn behaald om de methaanemissies uit mest te reduceren, is onderzocht welke technische maatregelen gecombineerd kunnen worden met het externe mestkoelingssysteem. Dit is belangrijk omdat er, in tegenstelling tot ammoniakemissiereductie, nog nauwelijks beleidsmatige, vergunningsmatige of economische prikkels zijn voor bedrijven of veehouders om te investeren in methaanemissiereductie. En omdat integrale concepten, wat betreft emissies, toekomstbestendiger zijn dan enkelvoudige technieken. Door middel van een ontwerpatelier en gesprekken met experts zijn de volgende twee integrale ontwerpconcepten bedacht:

1. Extern mest koelen in combinatie met een traditionele roostervloer en mestkelder + mestschuif + vloer sproeien met koud water & EOW + externe opslag.
2. Extern mest koelen in combinatie met een dichte vloer en mestschuif + sproeien met koud water + externe opslag.

Het ontwerpatelier werd uitgevoerd op 4 april 2023. De deelnemers waren twee melkveehouders met ervaring met mestkoelingsinstallaties (en betrokken bij het project) en nog drie andere geïnteresseerde melkveehouders. Verder waren er experts aanwezig op de volgende domeinen: koeltechniek, energievraagstukken in de veehouderij, datamanagement, mest(verwerking/bewaarding) en emissieonderzoek. Het ontwerpatelier werd georganiseerd, begeleid en geanalyseerd door leden van het projectteam. De ontwerpconcepten worden in dit hoofdstuk besproken, ze zijn niet volledig uitgewerkt en ze zijn niet de enige denkbare combinaties, maar ze bieden wel denkrichtingen om de uitstoot van gassen zoals ammoniak en methaan technisch te voorkomen of in ieder geval te verminderen en om beter om te gaan met (verliezen te voorkomen van) mineralen zoals stikstof en organische stof.



5.1 Extern mest koelen i.c.m. een traditionele roostervloer en mestkelder + vloer sproeien met koud water & EOW + externe opslag

Ongeveer 80% van de melkveebedrijven beschikt over een traditionele ligboxenstal met roostervloeren en mestkelders.

Het hier beschreven systeem biedt een oplossingsrichting voor ammoniak- en methaanemissiereductie uit mest voor de melkveesector als geheel zonder al te ingrijpende aanpassingen aan de stallen. Het ontwerpconcept is verder georganiseerd rond een (verbeterde versie van het) externe mestkoelingsstelsel zoals hierboven beschreven.

In de stal zorgt een mestschuif per loopgang ervoor dat de feces en urine die op de roostervloer vallen zo snel en volledig mogelijk van het vloeroppervlak worden verwijderd (elke 2 uur) en in de mestkelder terechtkomt. Dit is belangrijk voor ammoniakemissiereductie. Er wordt ervan uitgegaan dat op melkveebedrijven de bijdrage van de roostervloer 60 tot 75% bedraagt van de ammoniakemissie uit de stal (Van Dooren et al., 2019). Om de vloer goed te reinigen, wordt gebruik gemaakt van geëlektrolyseerd oxiderend water (EOW) en koud water.

Een installatie sproeit water voordat de mestschuiven langs komen. Dit proces vergemakkelijkt het reinigingsproces door bijvoorbeeld mest los te krijgen en te verdunnen, zodat de schraper de vloer gemakkelijker en vollediger kan vegen. Er wordt koud water gespreoid, dat betrokken kan worden van de koelinstallatie. Het koude water koelt de verse mest ($\approx 38,5$ °C) alvast wat terug. Verdunde mest is bovendien gemakkelijker/met minder energie te koelen (Wu et al., 2019).

De sproei-installatie kan op de schraper of aan de zijkanten van het looppad bij de ligboxen worden gemonteerd. Besproeien met water helpt niet alleen het reinigingsproces maar heeft ook een verdunnend effect. Door de urineplassen op de vloer te verdunnen met water, wordt de ammoniumconcentratie verlaagd, wat de ammoniakemissie vermindert¹⁶. Van Dooren et al. (2022) deden onderzoek op Dairy Campus naar het verdunnen van mest door middel van dagelijks besproeien van de roosters, wat resulteerde in een ammoniakemissiereductie van 37-40%. In dat onderzoek werd een water/mestverhouding van 0,7/1 gebruikt. In dit concept zal zeer waarschijnlijk minder water worden gebruikt vanwege het effect van EOW.

EOW ('electrolyzed oxidizing water', EOW; pH 6,8 – 7,0; oxidation reduction potential (ORP) > 930 mV; FAC 500 ppm; Aquaox BV, Soest) wordt geproduceerd door elektrolyse van kraanwater met opgelost natriumchloride (keukenzout). Bij het maken van EOW worden de volgende actieve desinfecterende componenten gevormd: hypochloorzuur (HClO), waterstofperoxide (H₂O₂) en ozon (O₃). Deze componenten werken in op de micro-organismen en de biofilm die op het vloeroppervlak wordt gevormd. Deze biofilm wordt gevormd door de feces en urine die frequent op de vloer vallen. Niet-eiwit-N-verbindingen, voornamelijk in de vorm van ureum, worden met de urine uitgescheiden (Monteny & Erisman, 1998). Het urease-enzym dat de omzetting van ureum in de urine katalyseert, waarbij ammoniak ontstaat (urease-reactie), wordt door deze micro-organismen in de feces en de biofilm op de vloer geproduceerd. Het ureum in de urineplassen op de stalvloer kan bij normale omstandigheden al binnen twee uur worden omgezet in ammoniak. Onderzoek toont aan dat de urease-activiteit sterk kan worden gereduceerd door toepassing van EOW op de vloer. Met een eenmalige behandeling van de vloer met EOW kan de urease-activiteit gedurende minimaal 2 dagen sterk worden gereduceerd (Aarnink & Puente-Rodríguez, 2018; Puente-Rodríguez & Bos, 2019; Zhang et al., 2025). EOW kan op het melkveebedrijf geproduceerd worden tegen relatief lage kosten. De actieve componenten die vrijkomen bij het maken van EOW worden relatief snel tot onschadelijke componenten afgebroken¹⁷. De 'proof of principle' is al beschreven in (Aarnink & Puente-Rodríguez, 2018; Puente-Rodríguez & Bos, 2019).

¹⁶ Mest verdunnen met water heeft geen effect op de methaanemissie.

¹⁷ EOW wordt bijvoorbeeld toegepast voor vermindering van microbiële besmetting op voedselverwerkende oppervlakken, roestvrij staal, laboratorium glaswerk of medische en tandheelkundige voorzieningen (Sakurai et al., 2002; Al-Haq et al., 2005; Buncic & Sofos, 2012; Mukhopadhyay & Ramaswamy, 2012).

Momenteel wordt in Sbv¹⁸ en andere projecten praktijkervaring met EOW opgedaan en een PhD-project bij WUR gebruikt de data uit de projecten om een rekenmodel te valideren om de metingen te extrapoleren naar andere omstandigheden (Zhang et al., 2025). Dit R&D traject moet deze innovatie tot een 'proof of concept' brengen.

Mestschuiven bereiken de doorsteken niet. Er zijn robots die deze locaties in de stal wel kunnen bereiken en water en EOW kunnen sproeien. Robots kunnen ook mest van het vloeroppervlak opzuigen, wat nieuwe perspectieven biedt voor schone stalvloeren. Schuiven worden over het algemeen als robuuster beschouwd dan robots. Dit concept is gebaseerd op roostervloeren en dus is het eigenlijk logischer om mestschuiven in te zetten zoals eerder aangekondigd. In de doorsteken kunnen sproeiers worden geplaatst om koud water en EOW toe te passen. Onderzoek moet uitwijzen of het effect van deze handeling zinvol is of dat de ammoniakemissie die hier optreedt, wordt geaccepteerd of dat er op deze ruimte aanvullende maatregelen moeten worden genomen.

Door het gebruik van water en EOW zal het mestvolume naar verwachting met circa 20% toenemen. Daarom is een mestopslag buiten de stal nodig om deze volumetoename buiten het groeiseizoen op te kunnen vangen. Het betreft een dichte opslag waarin de koude en verdunde drijfmest ook wordt gekoeld en koel wordt gehouden. In de wintermaanden zal de energievraag hiervoor laag zijn omdat de koude temperaturen buiten al een verkoelend effect hebben. Ook met goede isolatie en een goed werkend koelingssysteem, is het haalbaar om in de opslag de mest koel te houden, hier komt immers geen warme mest. Onderzoek en praktijkervaring moeten meer inzicht geven of het efficiënter is om zoveel mogelijk mest in de buitenopslag op te slaan vanwege de lage buitentemperaturen. Dit kan helpen om de energievraag te verminderen.

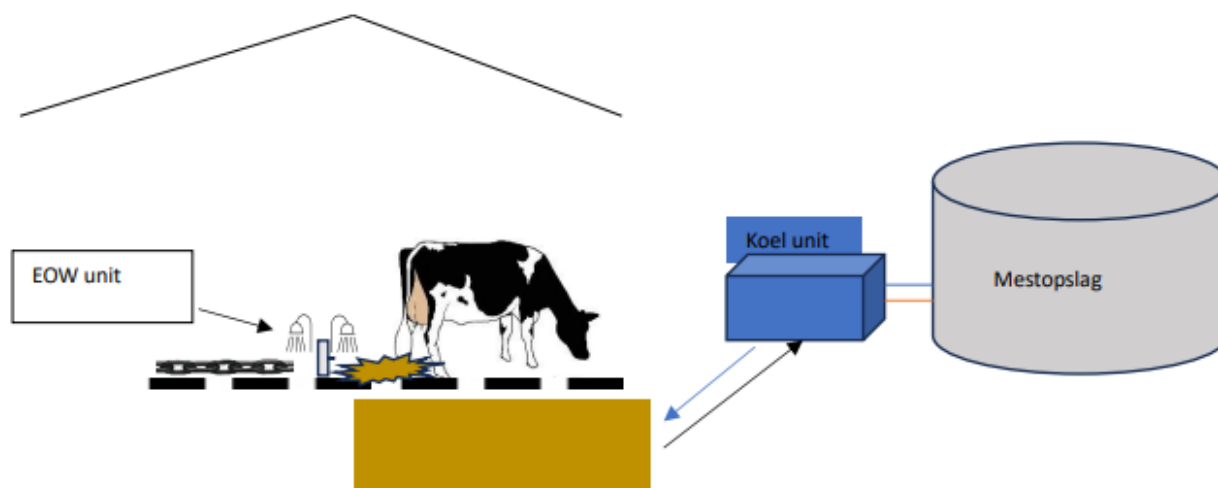
De warmte die uit de mest wordt onttrokken, wordt gebruikt om de bedrijfswoning en andere gebouwen op het melkveebedrijf te verwarmen. Andere mogelijke functies kunnen zijn het drogen van gras tijdens het groeiseizoen om de eiwitopbrengst te verhogen en het gras beter te benutten. Het drogen van fruit zou een andere optie kunnen zijn. Gedroogde fruitproducten zijn duur vanwege onder andere de benodigde energie/warmte. Deze processen sluiten aan bij huidige trends als kringlooplandbouw en 'agroforestry'. Het systeem draait voor zo ver mogelijk dankzij zon- en windenergie.

Aandachtspunten voor dit systeem zijn:

- Er moet onderzoek/pilots worden uitgevoerd en praktijkervaring opgedaan met de EOW-innovatie ten aanzien van dosering van EOW en water, de beste mestschuiven voor dit doel, reinigingsregimes (zomer, winter), etc.
- Hier wordt aangenomen dat de energiebehoefte van het voorgestelde systeem kan worden gehalveerd ten opzichte van het geteste prototype (zie Paragraaf 3.4).
- De noodzaak om drijfmest te mixen om de temperatuur van de mest laag te krijgen en te houden kan worden verminderd doordat er mest met koud water wordt verdund. Frequent mixen wordt echter gezien als een factor voor ammoniakemissie (Van der Stelt et al., 2007; Calvet et al., 2017), zie ook argumenten in Puente-Rodríguez et al. (2024).

Een conservatieve verwachting is een reductie van de ammoniakemissiereductie in de stal van > 50% en van methaan uit mest > 75% (zie Paragraaf 3.2). De externe mestopslag zal emissiearm zijn. Methaanuitstoot na aanwending van de drijfmest wordt als verwaarloosbaar beschouwd (Sherlock et al., 2002; Sommer et al., 2004; Van Bruggen et al., 2021) en drijfmest zal emissiearm op het land worden toegediend.

¹⁸ [Subsidie voor investeringen in verduurzaming voor veehouderijlocaties met piekbelasting \(Sbv\) | RVO.nl](#) (geraadpleegd mei 2025).



Figuur 12 Schematische weergave van ontwerpconcept mest koelen i.c.m. een traditionele roostervloer en mestkelder + vloer sproeien met koud water & EOW + externe opslag.

5.2 Extern mest koelen i.c.m. een dichte vloer en mestschuif + sproeien met koud water + externe opslag

Het ontwerpconcept is georganiseerd rond een (verbeterde versie van het) externe mestkoelingssysteem. In een traditionele ligboxenstal met roostervloer en mestkelders wordt een rubberen toplaag aangebracht. Er zijn nu al verschillende opties beschikbaar op de markt. Dit type indrukbare vloeren wordt gezien als diervriendelijker dan betonnen roostervloeren. Het hangt natuurlijk af van het materiaal en de uitvoering (zie EFSA-AHAW, 2023) maar het bedekken van de vloer met rubbermatten kan de klauwgezondheid verbeteren en kreupelheid tegengaan (Eicher et al., 2013), en de bewegingsvrijheid en comfort vergroten (Platz et al., 2008).

Het afdichten van de roostervloer met de rubbermat beperkt de luchtuitwisseling tussen stal en mestkelder wat de ammoniakemissie uit de kelder reduceert. De ammoniak die in de urine is opgelost, is in evenwicht met de ammoniak in de lucht, dat wil zeggen de grenslaag net boven de urineplas/mest (Mosquera et al., 2017): NH_3 (opgelost in urine) $\leftrightarrow$ NH_3 (gas, grenslaag lucht boven urineplas/mest). De ammoniak in deze grenslaag kan naar de lucht vervluchtigen via diffusie: NH_3 (gas, grenslaag urineplas/mest) $\rightarrow$ NH_3 (gas, lucht) (ibid.). Mosquera et al. (2017) leggen uit dat dit proces afhankelijk is van het verschil in concentratie tussen ammoniak in het mest/urinemengsel en in de onderste luchtlaag. Een optie om de ammoniakemissie te reduceren is dan de luchtbeweging langs het emitterende mestoppervlak te reduceren, in dit geval door de mestkelder af te dichten.

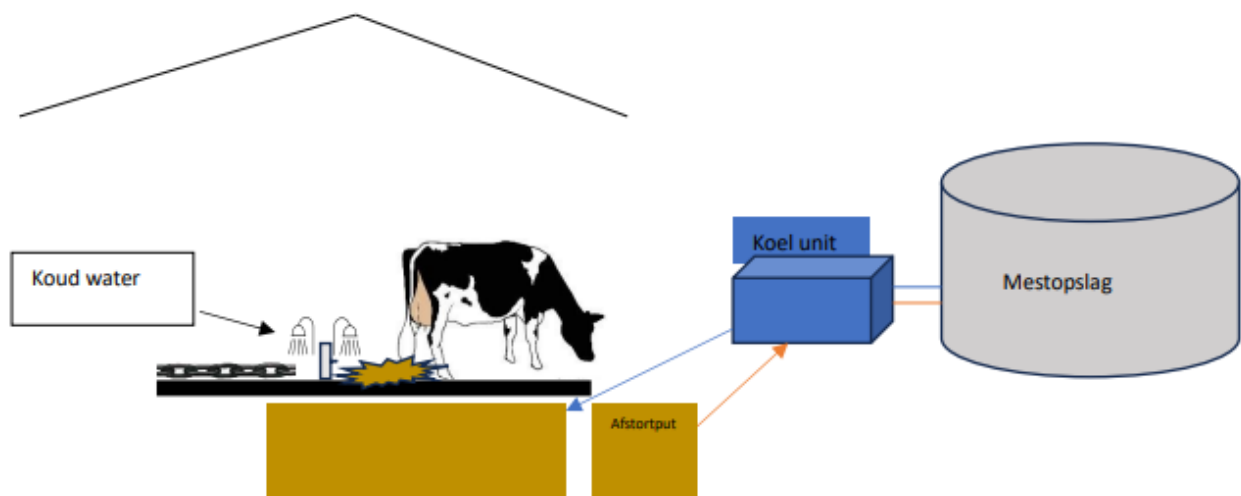
De rubbermat heeft ook een (nog te bepalen) isolerende werking, waardoor er relatief weinig koude-verlies optreedt vanuit de kelder. Verse en warme feces en urine (38,5 °C) vallen niet direct in de kelder, wat ook het koelingssysteem ondersteunt om de mest in de kelder koel te houden met minder energie.

Feces en urine vallen op de rubbermat. Mestschuiven zorgen ervoor dat de mest regelmatig (elke twee uur) wordt afgevoerd naar een mest-afstortput aan het einde van de gang. Deze afstortput is dicht zodat er geen luchtbeweging/tocht optreedt. De verse drijfmest wordt direct vanuit de afstort naar de mestcontainer gestuurd waar het wordt gekoeld.

De mat voor het afdichten van de vloer wordt gemaakt van thermoplastisch rubber, of andere kunststoffen zoals polyethyleen of rubberachtige materialen. Dit vanwege hun lage urease-activiteit, op achtergrondwaarden (Kasper et al., 2010; Puente-Rodríguez & Bos, 2019). Deze materialen zijn ook gemakkelijker schoon te maken (te reinigen) dan ruwere/poreuzere oppervlakken zoals beton.

Om de reiniging van vloeren te faciliteren wordt ook koud water over de vloer/rubbermat gespreeid. De lage urease-activiteit van het vloermateriaal in combinatie met het verdunnende effect van water en het regelmatig schrapen zullen zorgen voor een forse ammoniakemissiereductie in de stal¹⁹.

Koude mest wordt opgeslagen in de mestkelder onder de rubbermat en in een goed geïsoleerde buitenopslag. In deze opslagen komt geen warme mest waardoor er nauwelijks tot geen methaan wordt geproduceerd. Het streven is om de mest onder 10 °C te houden. Praktijkervaring moet uitwijzen of deze mest ook actief langs het koelingssysteem moet worden gebracht of dat er koelleidingen in de opslagen nodig zijn om de temperatuur laag te houden. Bij nieuwbouw kan worden overwogen om met dit systeem kelderloos te bouwen en mest in buitenopslagen op te slaan. Dit komt doordat zich in de wintermaanden op het primaire bedrijf de grootste hoeveelheid mest bevindt en de temperaturen dan ook laag zijn, wat het systeem energiezuiniger kan maken. Voor restwarmtebenutting zie het eerste ontwerpconcept.



Figuur 13 Schematische weergave ontwerpconcept mest koelen i.c.m. dichte vloer en mestschuif + sproeien met koud water + externe opslag.

¹⁹ Mocht uit praktijkervaring blijken dat met de tijd/gebruik toch een biofilm op de rubbermat ontstaat kan er worden overwogen om ook EOW toe te voegen.

6 Conclusie

Het doel van deze studie was om te testen en te bemeten of een mestkoelingssysteem de temperatuur van de opgeslagen mest onder praktijkomstandigheden van een melkveebedrijf onder de 8-10 °C kan brengen en houden om de methaanemissie uit mest fors (> 50%) te kunnen reduceren.

Gedurende het jaar van dit experiment heeft het geteste extern mestkoelingssysteem deze gewenste temperaturen niet bereikt. Vanwege het experimentele karakter van de studie is het wel aannemelijk dat deze streefwaarde bereikbaar is na een optimalisatie van het systeem. De gemiddelde temperatuur van de gekoelde mest werd 10,3 °C. Echter toen het systeem goed functioneerde waren deze streeftemperaturen binnen handbereik.

Vanwege de forse methaanemissiereductie uit mest die in deze case/control experiment is bereikt (en ook in vorige experimenten met 1.0 en 2.0 mestkoelingssystemen), namelijk 89%, is het aannemelijk dat een streef temperatuur van de opgeslagen mest van rond 10 °C voldoende kan zijn voor een forse methaanemissiereductie.

Er is een verdere ontwikkeling van mestkoelingssystemen nodig voordat implementatie kan worden overwogen. De focus dient te liggen op integrale ontwerpen (emissies, dierenwelzijn, inpasbaarheid, etc.), onderdelen en automatisering, evenals het slim inzetten van zonne- en windenergie en van restwarmte. Snelle en volledige koeling en afvoeren van verse feces en urine uit de stal, vloerreiniging, het opslaan van mest in buitenopslagen en het benutten van de lage wintertemperaturen zijn interessante ontwikkelingsrichtingen.

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.
- 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., & Puente-Rodríguez, D. (2018). Reduction of ammonia emission from areas where animals are maintained (European Patent Office. No. EP3723487, publication datum 28-06-2023).
- Al-Haq, M.I., Sugiyama, J., & Isobe, S. (2005). Applications of Electrolyzed Water in Agriculture & Food Industries. *Food Sci. Technol. Res.*, 11(2), 135-150.
- 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.
- Buncic, S., & Sofos, J. (2012). Interventions to control Salmonella contamination during poultry, cattle and pig slaughter. *Food Research International*, 45, 641-655. doi:10.1016/j.foodres.2011.10.018.
- 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., et al. (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., et al. (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.
- EFSA-AHAW. (2023). Welfare of dairy cows. 21(5), e07993. doi:10.2903/j.efsa.2023.7993.
- Eicher, S.D., Lay, D.C., Arthington, J.D., & Schutz, M.M. (2013). Effects of rubber flooring during the first 2 lactations on production, locomotion, hoof health, immune functions, and stress. *Journal of Dairy Science*, 96, 3639-3651. doi:10.3168/jds.2012-6049.
- 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. Rapport 1235.
- Groot Koerkamp, P.W.G., Metz, J.H.M., Uenk, G.H., Phillips, V.R., Holden, M.R., Sneath, R.W., et al. (1998). Concentrations and emissions of ammonia in livestock buildings in northern Europe. *J. Agric. Eng. Res*, 70(1), 79-95. doi:10.1006/jaer.1998.0275.
- Gustafsson, G., Jeppsson, K., Hultgren, J., & Sanno, J.-O. (2005). Techniques to Reduce the Ammonia Emission from a Cowshed with Tied Dairy Cattle. *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal*.
- Im, S., Petersen, S.O., Lee, D., & Kim, D.-H. (2020). Effects of storage temperature on CH₄ emissions from cattle manure and subsequent biogas production potential. *Waste Management*, 101. doi:10.1016/j.wasman.2019.09.036.

- Jablonski, 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.
- Kasper, G.J., Blanken, K., & Bokma, S. (2010). *De urease-activiteit van Comfort Slat Mats in vergelijking met betonrooster in rundveestallen*. Wageningen Livestock Research. Rapport 390.
- McVoitte, W.P.A., & Clark, O.G. (2019). The effects of temperature and duration of thermal pretreatment on the solid-state anaerobic digestion of dairy cow manure. *Heliyon*, 5(7), e02140. doi:10.1016/j.heliyon.2019.e02140.
- 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 Livestock Research. Rapport 645.
- Mosquera, J., Ploegaert, J.P.M. & Kupers G.C.C. (2019). Determination of ammonia concentrations in air from livestock housing systems. Reference method using gas washing as applied by Wageningen Livestock Research. Wageningen Livestock Research Rapport 1187.
- Mukhopadhyay, S., & Ramaswamy, R. (2012). Application of emerging technologies to control Salmonella in foods: A review. *Food Research International*, 25, 666–667. doi:10.1016/j.foodres.2011.05.016.
- Ogink, N.W.M., Groenestein, C.M., & Mosquera, J. (2014). *Actualisering ammoniakemissiefactoren rundvee: advies voor aanpassing in de Regeling ammoniak en veehouderij*. Wageningen 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.
- Petersen, S.O. Ma, C., Hilgert, J.E., Mjöfors, K., Sefeedpari, P., Amon, B. et al. (2024). In-vitro method and model to estimate methane emissions from liquid manure management on pig and dairy farms in four countries. *Journal of Environmental Management*, 353, 120233. doi:10.1016/j.jenvman.2024.120233.
- Petersen, S.O., Olsen, A.B., Elsgaard, L., Triolo, J.M., & Sommer, S.G. (2016). Estimation of Methane Emissions from Slurry Pits below Pig and Cattle Confinements. *PLoS ONE*, 11(8), e0160968. doi:10.1371/journal.pone.0160968.
- Platz, S., Ahrens, F., Bendel, J., Meyer, H.H.D., & Erhard, M.H. (2008). What happens with cow behavior when replacing concrete slatted floor by rubber coating: a case study. *Journal of Dairy Science*, 91, 999–1004. doi:10.3168/jds.2007-0584.
- Poteko, J., Zühner, M., & Schrader, 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. (2019). *Environmental Dairy Design for 2020 (EDD20): Ontwerpen voor huisvestingssystemen van melkvee met lage ammoniakemissie*. Wageningen Livestock Research. Rapport 1162.
- 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.
- 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.
- Rico, J.L., García, H., Rico, C., & Tejero, I. (2007). Characterisation of solid and liquid fractions of dairy manure with regard to their component distribution and methane production. *Bioresource Technology*, 98, 971–979. doi:10.1016/j.biortech.2006.04.032.
- 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.
- Sakurai, Y., Ogoshi, K., Kaku, M., & Kobayashi, I. (2002). Strongly acidic electrolyzed water: Valuable disinfectant of endoscopes. *Digestive Endoscopy*, 15, 19–24.
- Sherlock, R.R., Sommer, S.G., Khan, R.Z., Wood, C.W., Guertal, E.A., Freney, J.R., et al. (2002). Emission of ammonia, methane and nitrous oxide from pig slurry applied to a pasture in New Zealand. *Journal of Environmental Quality*, 31(5), 1491–1501. doi:10.2134/jeq2002.1491.
- Sommer, S.G., Petersen, S.O., & Møller, H.B. (2004). Algorithms for calculating methane and nitrous oxide emissions from manure management. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 69, 143–154. doi:10.1023/B:FRES.0000029678.25083.fa.
- Van Bruggen, C., Bannink, A., Bleeker, A., Bussink, D.W., Van Dooren, H.J.C., Groenestein, C.M., et al. (2024). *Emissies naar lucht uit de landbouw, 1990-2022: Berekeningen met het model NEMA*. Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WUR.
- Van Bruggen, C., Bannink, A., Groenestein, C.M., Huijsmans, J.F.M., Lagerwerf, L.A., Luesink, H.H., et al. (2021). *Emissies naar lucht uit de landbouw berekend met NEMA voor 1990-2019*. WOt-technical report 203.
- Van der Net, L., Coenen, P.W.H.G., Van Mil, S.E.H., Rienstra, J.D., Zijlema, P.J., Baas, K. et al. (2025). *Greenhouse gas emissions in the Netherlands 1990–2023. National Inventory Document 2025*. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). RIVM report 2024-0017.
- Van der Net, L., Staats, N., Coenen, P.W.H.G., Rienstra, J.D., Zijlema, P.J., Arets, E.J.M.M., et al. (2024). *Greenhouse gas emissions in the Netherlands 1990–2022. National Inventory Report 2024*. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). RIVM report 2025-0005.
- 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., Blanken, K., & Ogink, N.W.M. (2022). *Reductie van ammoniakemissie door gebruik van water in melkveestallen; Resultaten van emissiemetingen op Dairy Campus*. Wageningen Livestock Research. Rapport 1304.
- Van Dooren, H.J.C., Ogink, N.W.M., Van Riel, J.W., Mosquera, J., & Zonderland, J.L. (2019). *Beïnvloeding van de ammoniakemissie uit melkveestallen met roostervloer door beweiding; Onderzoek op Dairy Campus*. Wageningen Livestock Research. Rapport 1170.
- Witarsa, F., & Lansing, S. (2015). Quantifying methane production from psychrophilic anaerobic digestion of separated and unseparated dairy manure. *Ecological Engineering*, 78, 95–100. doi:10.1016/j.ecoleng.2014.05.031.
- 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 storages for animal manure. *Fertilizer Research*, 37, 207–211.
- Zhang, J., Puente-Rodríguez, D., Bos, A.P., Ogink, N., & Aarnink, A.J.A. (2025). Inhibiting urease activity to reduce ammonia emissions from dairy houses through application of disinfectants on different floor types. *Biosystems Engineering*, 257, 104217. doi:10.1016/j.biosystemseng.2025.104217.

Bijlage 1 Overzicht van meetresultaten bij uitgeschakeld mestkoelsysteem

Het koelsysteem was uitgeschakeld tussen 18 augustus en 23 oktober 2023. Deze gelegenheid werd benut om te controleren op eventuele afwijkingen tussen de kelders. Op basis van het temperatuurverschil en de resultaten van de emissiemetingen is besloten geen correcties aan te brengen op de in dit rapport gepresenteerde resultaten.

Tabel 1.1 *Gemiddelde temperatuur (°C, 24/7 metingen) case en control mest en verschil.*

Periode – 2023	T-control	T-case	T-verschil
	Control-case		
19 augustus tot en met 23 oktober	16,0	15,5	-0,5

Tabel 1.2 *Gemiddelde temperatuur (°C handmatige metingen) case en control mest en verschil.*

2023	T- control	T-case	T-verschil control-case
27 september	16,1	15,8	-0,3
18 oktober	14,0	14,3	0,3

Tabel 1.3 *Samenvatting van emissies (medianen in mg/m²/u) uit mest en het verschil (%) tussen control (niet gekoeld) en case (koeling) voor CH₄, NH₃ en N₂O.*

Datum	CH ₄ control (mg/m ² /u)	CH ₄ case (mg/m ² /u)	Verschil CH ₄ (%)	NH ₃ control (mg/m ² /u)	NH ₃ case (mg/m ² /u)	Verschil NH ₃ (%)	N ₂ O control (mg/m ² /u)	N ₂ O case (mg/m ² /u)	Verschil N ₂ O (%)
27-9-2023	780	1070	37%	22,4	10,7	-52%	0,31	0,28	-8%
18-10-2023	502	722	44%	7,1	10,0	40%	0,03	0,08	167%

Bijlage 2 Protocol for estimation of methane production rates in manure

Het protocol is hieronder bijgevoegd, waarbij ook is aangegeven hoe de testopzet bij LeAF precies is. Het LeAF protocol is in de loop van de tijd veranderd ten opzichte van het originele M4Models protocol. Deze wijzigingen zijn in overleg met WLR gemaakt en zijn hier tussen het symbool [] aangegeven.

Background

Within the *M4Models* project, WP3 includes a screening of methane production rates in manure from finishing pig and dairy cattle farms, which can represent these categories in the parameterisation of sub models for estimation of daily methane emission rates in each country. The project has plans to develop a new incubator to support such measurements, but this will not be ready in time for the screening program and – moreover – the incubator will not be available to all partners. This was already foreseen when preparing the proposal, which is why the WP3 description states that *"The screening program will follow the protocols of (Petersen, Olsen, Elsgaard, Triolo, & Sommer, 2016) to ensure timely delivery of data for the model parameterization in Task 3.1."*

The protocol as described in Petersen et al. (2016) has limited detail, and instead the paper refers to (Elsgaard et al., 2016). The step-by-step procedure presented below builds on these previous protocols, with a few simplifications. Note that currently the protocol does not describe the selection of farm types or collection of manure samples. Neither does it describe GC analysis or processing of the results. This part must be included later after further discussions.

Briefly, about the incubation conditions: Slurry samples are sieved to exclude straw and bedding material. This is supported by information presented in Elsgaard et al. (2016)²⁰. This paper also showed nearly identical temperature response after 17 and 41 h incubation of a selected slurry sample; based on this the procedure described below is flexible and recommends an 18-24 h time window, but of course the exact time of incubation should be recorded. The temperature response, Q10, was similar among different manure materials (Elsgaard et al., 2016), and therefore adjustment of temperature with a limited range seems acceptable.

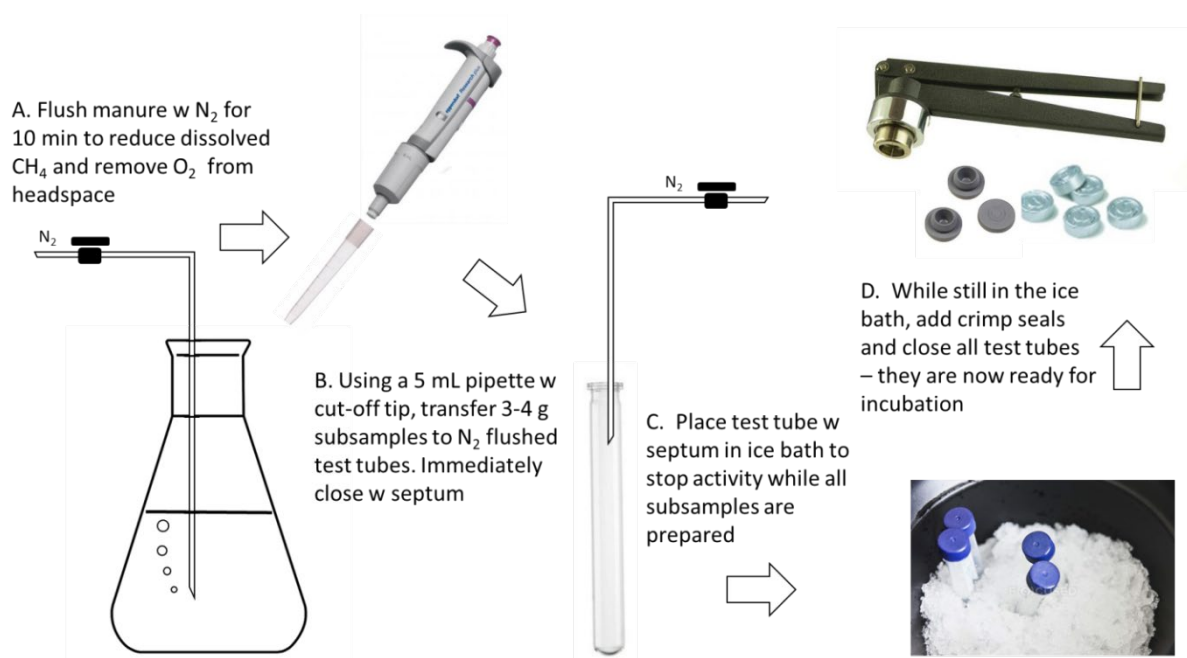
Principle

- a. ~~Eight~~ [LeAF: 6] manure subsamples are incubated anaerobically at a constant, near-ambient temperature for a period of ~~18–24 h~~ [LeAF: 7 days].
- b. ~~Six~~ [LeAF: 4] replicates are used for incubation, and the remaining two replicates to determine any residual dissolved methane at the beginning of incubation.
- c. Before the incubation is terminated, the gas volume in each test tube is adjusted to allow for gas sampling.
- d. A headspace gas sample is then transferred from each replicate to a ~~vial for GC analysis~~ [LeAF: gassample is diluted and directly injected into the GC].
- e. From methane concentration, total gas production, dilution factors, and manure weight, the methane production rate per kg VS is calculated.

²⁰ "Slurry materials were sieved to <2 mm in order to allow reproducible subsampling of 3-g aliquots for the TGI incubations. (Rico et al. 2007) sieved cow manure to <1 mm and examined the composition and CH₄ production at 35 °C of untreated and sieved manure. Mainly cellulose and hemicellulose was removed by sieving, while the relative proportions of fat and protein increased; accumulated CH₄ production per g VS after 45 d was 20% greater in the sieved manure, indicating a modest change in CH₄ production potential as a result of sieving. However, shifting the balance between dissolved and particulate organic matter could change the immediate degradability and hence the short-term dynamics of CH₄ production. A recent study by Witarso and Lansing (Witarso & Lansing, 2015) examined the time course of CH₄ production in untreated and screw-press separated dairy manure at 14 and 24 °C. They found greater long-term production of CH₄ from VS in untreated manure, but no significant difference in CH₄ production during the first 16 d at either temperature. This implies that for determination of CH₄ production rates in short-term incubations (here, <2 d), sieved manure is an acceptable representation of the intact sample." (Elsgaard et al., 2016)

Equipment (see also illustration below)

- Pressurised N₂ for flushing
- Gas tubing with disposable extension to bubble manure sample.
- Test tubes (18 × 150 mm) for crimp sealing²¹
- Racks for test tubes
- Butyl rubber septa
- Crimp seals + Crimper to close test tubes
- ~~Box/tray with ice water~~
- Cooling water bath which can simulate the recorded ambient temperature.
- Glass syringe, 10 mL
- Plastic syringe, 5 or 10 mL for gas sampling
- Injection needles ("blue base")
- ~~GC vials, for example 5.9 mL exetainers – prelabelled~~



An overview of the process to determine CH₄ production rates in manure. Sample collection and preparation is not included, and neither is GC analysis or calculations.

Procedure

The procedure is illustrated in the diagram above, and below a step-by-step description is presented.

1. ~~A portion of manure is sieved < 2 mm.~~ [from 26-7-2021 this step will be omitted. Only if the slurry is mixed with bedding that makes working with the sample difficult, a sieve with a large mesh size will be used.]
2. The manure sample is gently bubbled for 10-15 min with N₂ to remove CH₄ from the liquid phase; this is done to reduce the background of dissolved CH₄ in the subsamples for incubation.
3. Determine the weight of test tube + septum, to allow calculation of exact manure mass used for each replicate.
4. While continuously flushing the slurry with N₂, transfer 8 subsamples of c. 3 mL to 28 mL test tubes using a 5 mL pipette with a cut-off plastic tip. The recipient test tube should also be flushed with N₂ during this

²¹ Link to test tube w crimp seal to be used for incubations (but there may be other suppliers)
[https://chemglass.com/\(X\(1\)S\(f1rpqqcrkj4yhrqmrzgw4bso\)\)/anaerobic-culture-tubes-aluminum-seals?AspxAutoDetectCookieSupport=1](https://chemglass.com/(X(1)S(f1rpqqcrkj4yhrqmrzgw4bso))/anaerobic-culture-tubes-aluminum-seals?AspxAutoDetectCookieSupport=1) The 10 mm thick butyl rubber stoppers shown here are difficult to penetrate, and I recommend using thinner butyl rubber septa – see step D in illustration above.

transfer to avoid oxygen contamination. [from 21-6-2021 the replicates per test at LeAF are 4, thus 6 tubes will be filled instead of 8]

5. Immediately close the test tube (under N₂ headspace) with a butyl rubber stopper and record the weight (2 decimals) ~~before placing the test tube in an ice bath to suppress methanogenesis~~. [In the adjusted protocol, the ice bath is omitted. We will therefore not use the ice bath. Tubes are kept at room temperature, before they are put in the incubator. The time between filling the tubes and putting them in the incubator will be kept at a minimum. One manure sample per time will be incubated.]

6. When all subsamples are ready, add a crimp seal to all test tubes and secure using the crimper.

7. Evacuate and refill test tubes with N₂ three times to remove any residual oxygen [flushing only" is also allowed in the protocol, this is what we will do to make the headspace anaerobic]; ~~after the last refill with N₂ the pressure is released, and test tubes with N₂ headspace are returned to the ice bath until all samples are ready for incubation.~~

8. Transfer 6 replicates to a water bath at a temperature that should not deviate by more than $\pm 3^{\circ}\text{C}$ from the ambient manure temperature recorded during sample collection. [from 21-6-2021 the number of replicates at LeAF is 4].

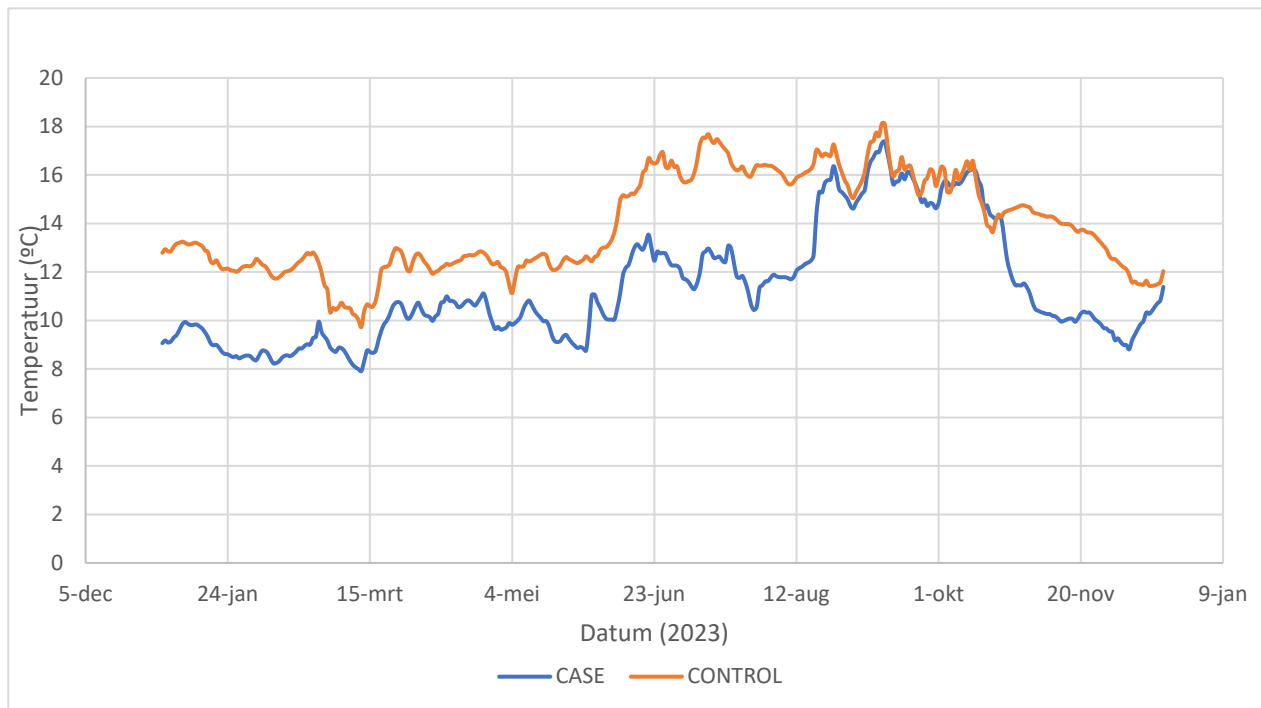
9. The last 2 replicates are used for determination of background CH₄ concentrations immediately after the incubation has started: Shake vigorously for 30 s using a whirly mixer. Then insert a glass syringe and record any gas evolved (and 0 if no gas was evolved). Finally, add 4 mL N₂ using plastic syringe and hypodermic needle, mix by pumping with the piston, and then transfer 3 mL headspace gas to a pre-labelled GC vial²².

10. The incubation of manure samples should be terminated after 18-24 h. Around 30 min before termination, add 4 mL N₂ to all replicates (this will allow the gas to equilibrate to the ambient temperature). [from 21-6-2021 the test duration will be 7 days instead of 24 h]

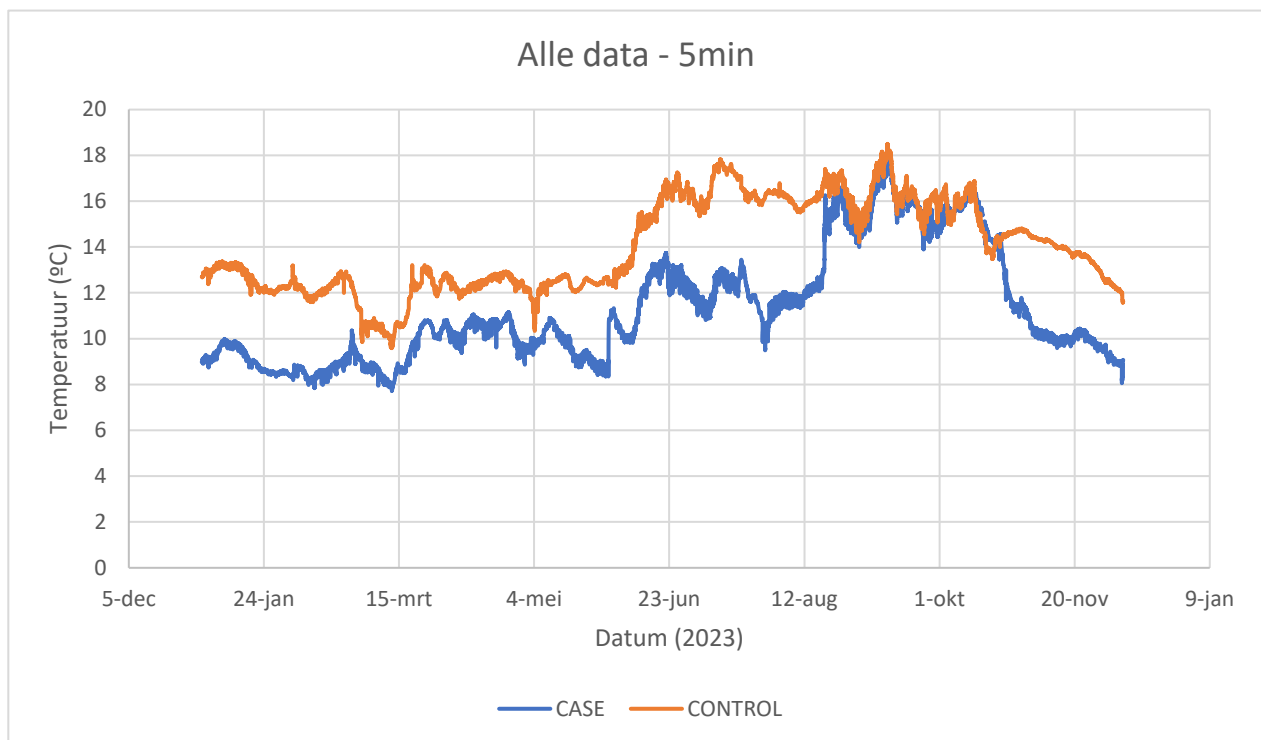
11. At the time of termination, and with test tubes still in the water bath, determine total over-pressure using a 10-mL glass syringe. [Currently, measurements with a pressure meter instead of a syringe are also allowed. LeAF will choose for the measurements with the pressure meter]. After reading the gas volume, transfer a 3-mL sample of the headspace gas to a GC vial. [at LeAF, the gas samples taken from the tubes will be diluted in a syringe and directly injected into the GC, and not first transferred to GC vials.]

²² The total gas sample volume may vary from one lab to the next. If necessary, equilibrate GC vials with the gas used as matrix for calibration gases, and correct for the dilution when calculation CH₄ production rates. At AU we use 5.9 mL Exetainers (Labco Inc., Lampeter, UK) previously equilibrated to atmospheric pressure with a 20/80 mixture of O₂ and N₂.

Bijlage 3 Temperatuurgrafieken



Figuur 3.1 Daggemiddelde temperatuurverschil (alle thermometers) tussen case (blauw) en control (oranje).



Figuur 3.2 Temperatuurverschil (alle thermometers) tussen case (blauw) en control (oranje).

Bijlage 4 Resultaten

In deze bijlage worden de resultaten gepresenteerd, ook van de meetdagen of periodes toen het mestkoelingssysteem uit stond.

Tabel 4.1 Handmatige temperatuurmetingen op meetdagen. 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.

	Gekoeld									Gem.	Referentie									Gem.
	Opp.	-20 cm	-40 cm	-60 cm	-80 cm	-100 cm	-120 cm	-140 cm	Bodem		Opp.	-20 cm	-40 cm	-60 cm	-80 cm	-100 cm	-120 cm	-140 cm	Bodem	
1-2-2023	9,4	8,9	8,5	8,5	8,5	7,4	8,8		7,4	8,4	12,5	15,3	15,0	14,4	14,1	13,9	13,7		13,6	14,1
22-3-2023	12,4	11,6	10,7	10,5	10,6				10,3	11,0	13,8	13,9	13,2	12,8	12,7	12,6			12,6	13,1
3-5-2023	11,1	10,7	10,3	10,4					10,5	10,6	11,2	11,6	11,9	11,5					11,8	11,6
14-6-2023	13,5	12,2	12,1	11,9					11,8	12,3	16,3	14,4	13,6						13,9	14,5
19-7-2023	15,3	14,0	12,8	12,7					12,6	13,5	17,7	17,5	16,7	16,6					16,4	17,0
29-11-2023	10,2	11,4	11,2	11,2	11,1	10,6			10,9	10,9	11,9	12,4	13,0	13,3	13,5	13,5	13,6		13,7	13,1
Gem.	12,0	11,5	10,9	10,8	10,1	9,0	8,8		10,6	10,9	13,9	14,2	13,9	13,7	13,4	13,3	13,7		13,7	13,8

Tabel 4.2 Handmatige temperatuurmetingen op alle meet- en testdagen. Gemiddelde mesttemperaturen (°C) tijdens de test- en meetdagen. Met een kleurschaal van blauw (koudst) naar rood (warmst) wordt het temperatuurverschil van de opgeslagen mest weergegeven, gemiddelde waarden in groen.

	Gekoeld									Gem.	Referentie									Gem.
	Opp.	-20 cm	-40 cm	-60 cm	-80 cm	-100 cm	-120 cm	-140 cm	Bodem		Opp.	-20 cm	-40 cm	-60 cm	-80 cm	-100 cm	-120 cm	-140 cm	Bodem	
1-2-2023	9,4	8,9	8,5	8,5	8,5	7,4	8,8		7,4	8,4	12,5	15,3	15,0	14,4	14,1	13,9	13,7		13,6	14,1
22-3-2023	12,4	11,6	10,7	10,5	10,6				10,3	11,0	13,8	13,9	13,2	12,8	12,7	12,6			12,6	13,1
3-5-2023	11,1	10,7	10,3	10,4					10,5	10,6	11,2	11,6	11,9	11,5					11,8	11,6
14-6-2023	13,5	12,2	12,1	11,9					11,8	12,3	16,3	14,4	13,6						13,9	14,5
19-7-2023	15,3	14,0	12,8	12,7					12,6	13,5	17,7	17,5	16,7	16,6					16,4	17,0
27-9-2023	16,3	15,8	15,9	15,8					15,4	15,8	16,5	16,3							15,9	16,2
18-10-2023	12,3	14,2	14,7	15,1					15,2	14,3	11,9	14,1	14,6	14,8					14,9	14,0
29-11-2023	10,2	11,4	11,2	11,2	11,1	10,6			10,9	10,9	11,9	12,4	13,0	13,3	13,5	13,5	13,6		13,7	13,1
Gem.	12,6	12,3	12,0	12,0	10,1	9,0	8,8		11,8	11,8	14,0	14,4	14,0	13,9	13,4	13,3	13,7		14,1	14,0

Tabel 4.3 Samenvatting van emissies op meetdagen (medianen in mg/m²/u) uit mest en het verschil (%) tussen control (niet gekoeld) en case (koeling) voor CH₄, NH₃ en N₂O.

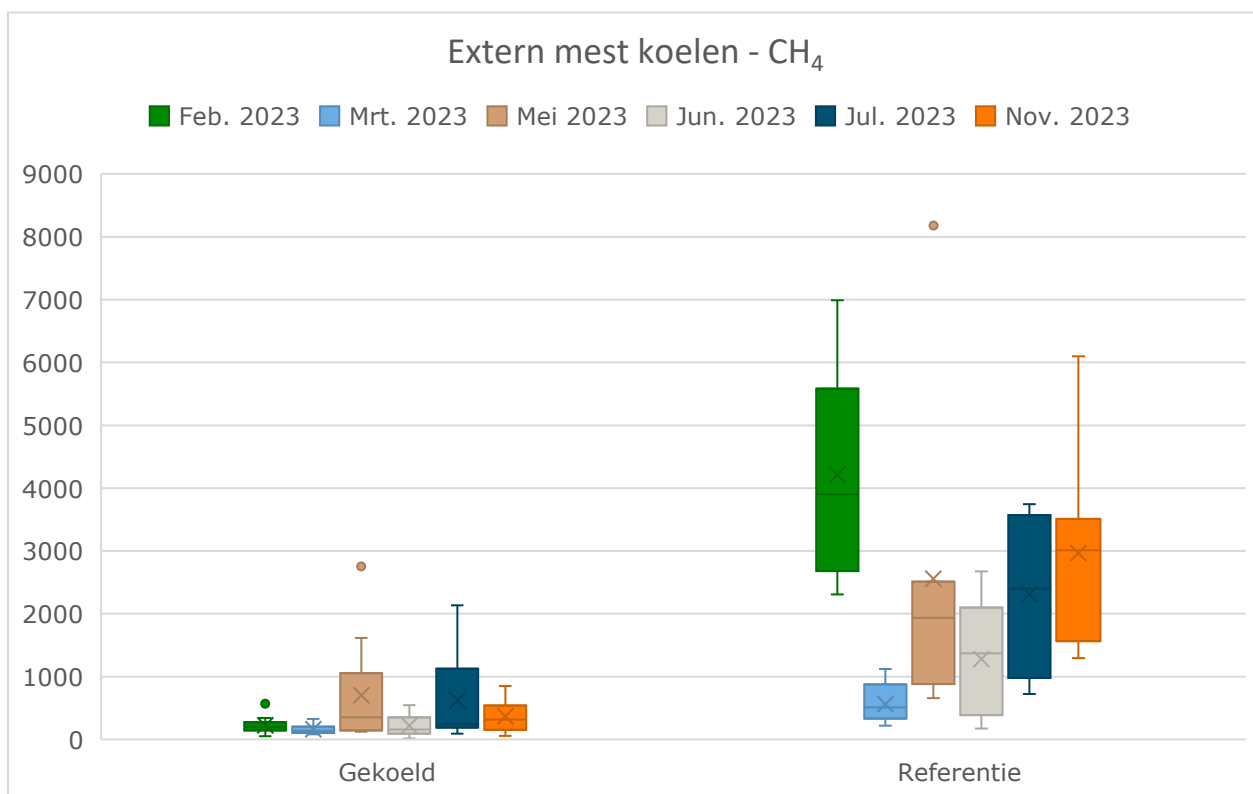
Datum	CH ₄ control (mg/m ² /u)	CH ₄ case (mg/m ² /u)	Vershil CH ₄ (%)	NH ₃ control (mg/m ² /u)	NH ₃ case (mg/m ² /u)	Vershil NH ₃ (%)	N ₂ O control (mg/m ² /u)	N ₂ O case (mg/m ² /u)	Vershil N ₂ O (%)
1-2-2023	3904	193	-95%	1,0	2,5	150%	0,03	0,10	224%
22-3-2023	424	135	-68%	1,8	4,7	154%	0,05	0,06	16%
3-5-2023	2112	286	-86%	6,6	11,8	78%	0,01	0,06	583%
14-6-2023	959	150	-84%	12,0	5,7	-52%	0,08	0,08	-6%
19-7-2023	2053	231	-89%	1219 ^a	574 ^a	-53%	0,19	0,45	140%
29-11-2023	2537	294	-88%	1,7	2,5	52%	0,05	0,12	116%
Gem. ± SD	1998 ± 1225	215 ± 67	-89%*	4,6 ± 4,7	5,4 ± 3,8	18%	0.07 ± 0.06	0.14 ± 0.15	179%**

^a Uitbijter, niet meegenomen in bepaling van het gemiddelde.

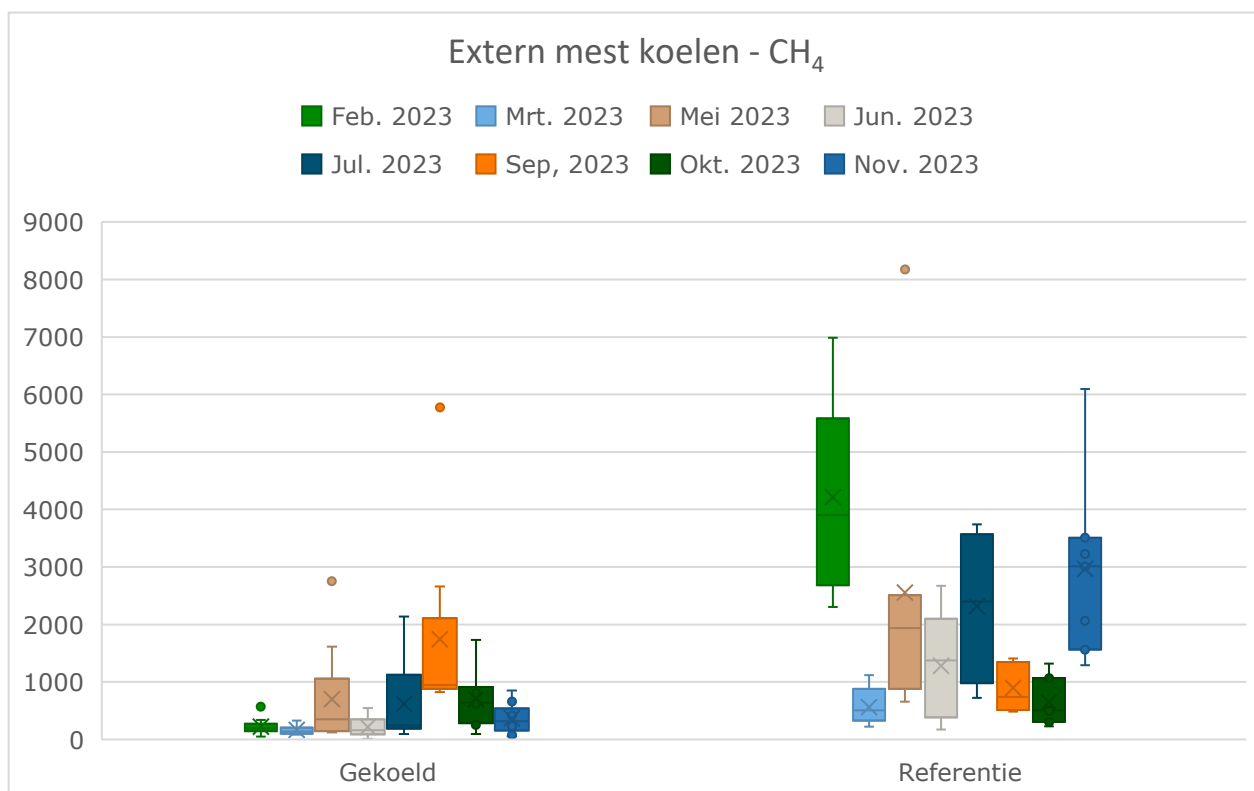
Tabel 4.4 Samenvatting van emissies op meet- en testdagen (medianen in mg/m²/u) uit mest en het verschil (%) tussen control (niet gekoeld) en case (koeling) voor CH₄, NH₃ en N₂O.

Datum	CH ₄ control (mg/m ² /u)	CH ₄ case (mg/m ² /u)	Vershil CH ₄ (%)	NH ₃ control (mg/m ² /u)	NH ₃ case (mg/m ² /u)	Vershil NH ₃ (%)	N ₂ O control (mg/m ² /u)	N ₂ O case (mg/m ² /u)	Vershil N ₂ O (%)
1-2-2023	3904	193	-95%	1,0	2,5	150%	0,03	0,10	224%
22-3-2023	424	135	-68%	1,8	4,7	154%	0,05	0,06	16%
3-5-2023	2112	286	-86%	6,6	11,8	78%	0,01	0,06	583%
14-6-2023	959	150	-84%	12,0	5,7	-52%	0,08	0,08	-6%
19-7-2023	2053	231	-89%	1219 ^a	574 ^a	-53%	0,19	0,45	140%
27-9-2023	780	1070	37%	22,4	10,7	-52%	0,31	0,28	-8%
18-10-2023	502	722	44%	7,1	10,0	40%	0,03	0,08	167%
29-11-2023	2537	294	-88%	1,7	2,5	52%	0,05	0,12	116%
Gem. ± SD	1659 ± 1213	285 ± 334	-77%*	7,5 ± 7,7	6,8 ± 3,9	-9%	0.09 ± 0.10	0.15 ± 0.14	63%**

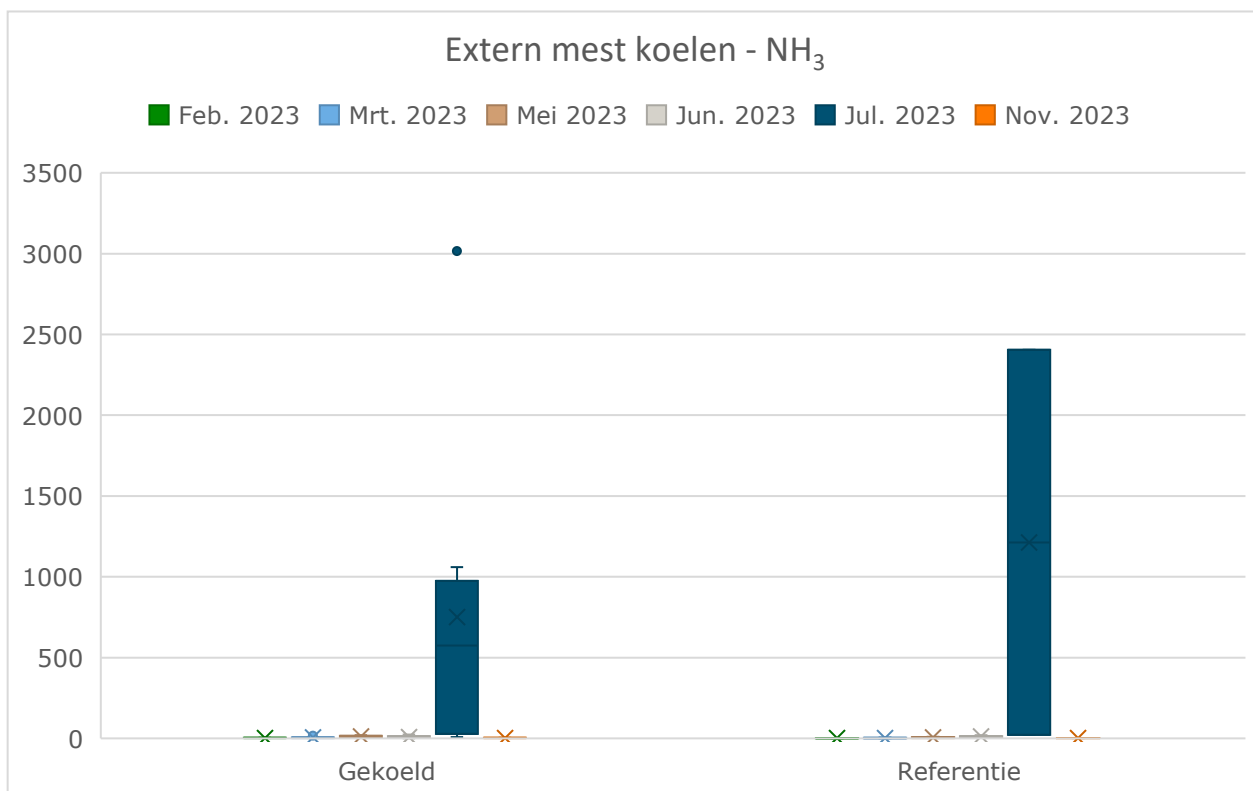
^a Uitbijter, niet meegenomen in bepaling van het gemiddelde.



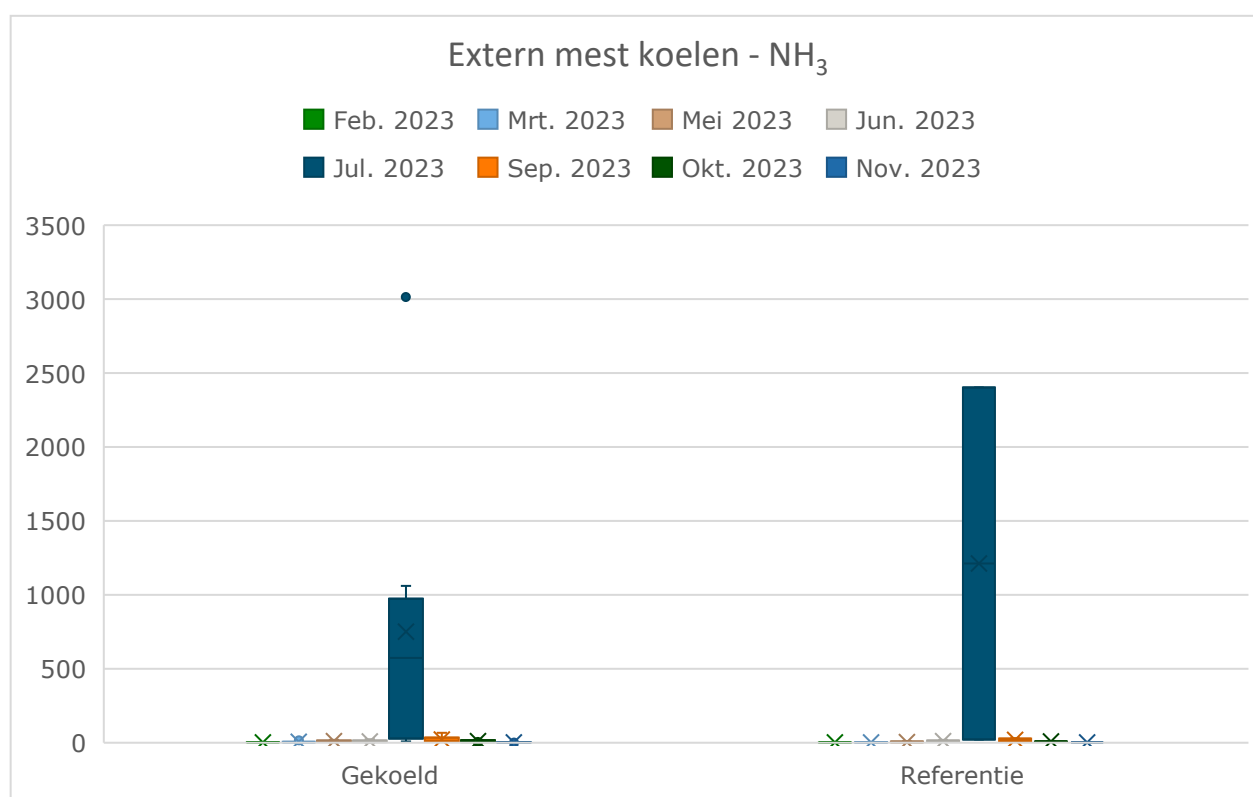
Figuur 4.1 Boxplot van metingen aan wel en niet gekoelde drijfmest. Y-as emissies in mg/m²/u CH₄. Per meetdag en behandeling geven de horizontale lijnen een vijf-getallensamenvatting: van onder naar boven minimum, eerste kwartiel, mediaan, derde kwartiel en maximum. De kruisjes zijn het gemiddelde, bolletjes uitbijters. NB zowel de gekoelde als referentie mestkelder werden tweemaal daags gedurende tien minuten gemixt.



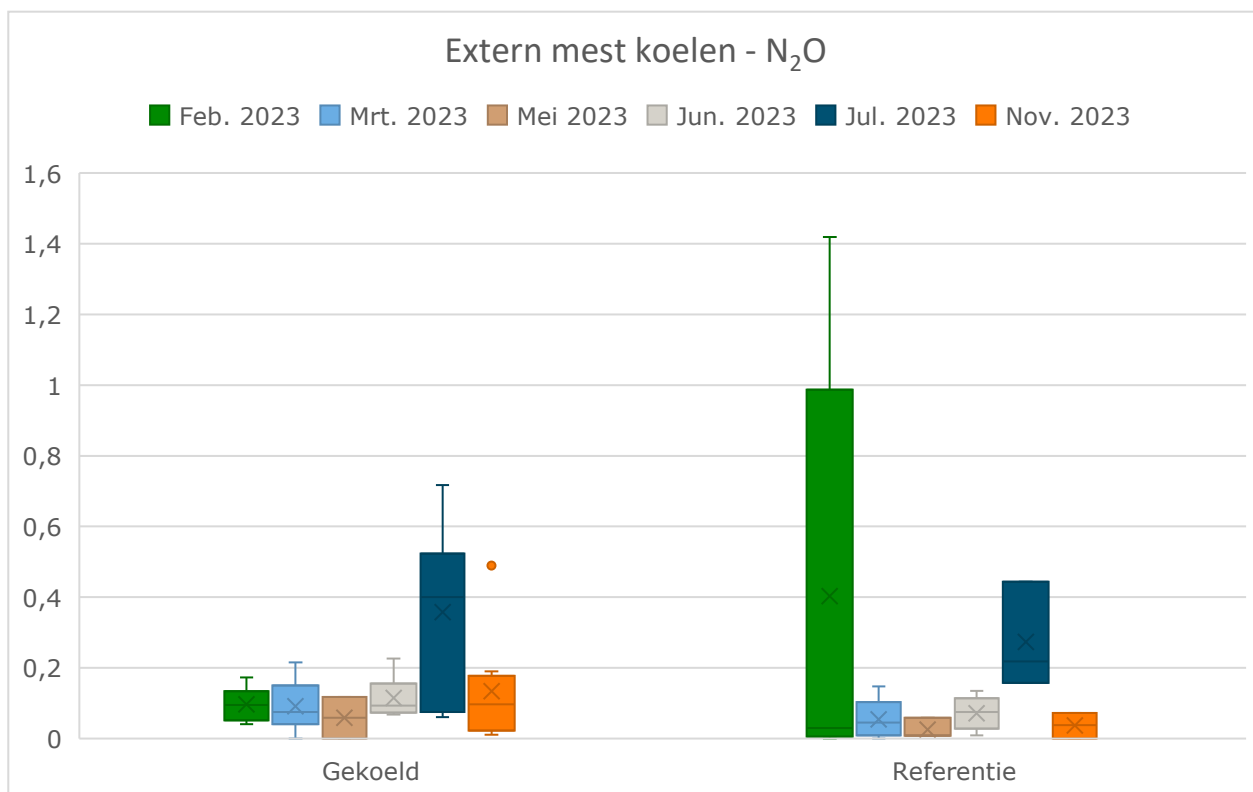
Figuur 4.2 Boxplot van metingen aan wel en niet gekoelde drijfmest op alle meet- en testdagen - Methaan.



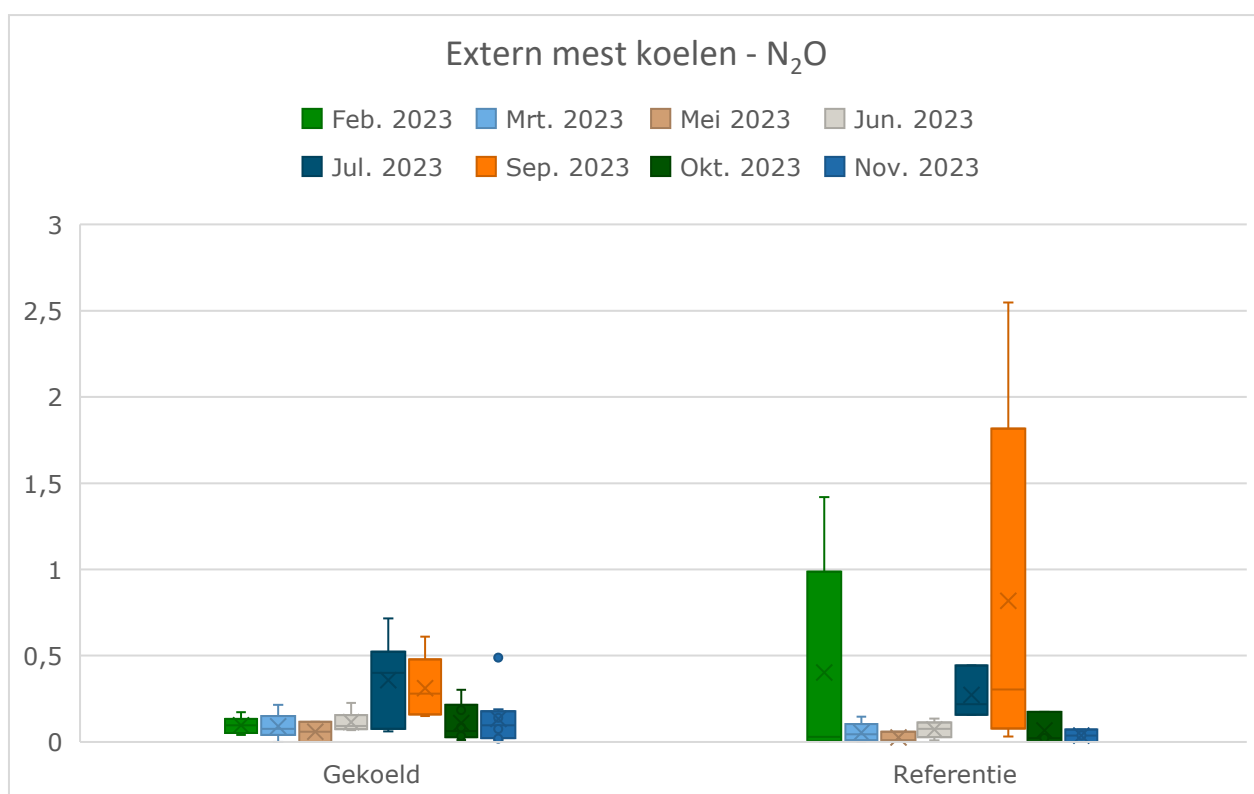
Figuur 4.3 Boxplot van metingen aan wel en niet gekoelde drijfmest op alle meetdagen -Ammoniak.



Figuur 4.4 Boxplot van metingen aan wel en niet gekoelde drijfmest op alle meet- en testdagen - Ammoniak.



Figuur 4.5 Boxplot van metingen aan wel en niet gekoelde drijfmest op alle meetdagen - Lachgas.



Figuur 4.6 Boxplot van metingen aan wel en niet gekoelde drijfmest op alle meet- en testdagen - Lachgas.

Tabel 4.5 *Analyseresultaten mestmonsters. Resultaten van meetdagen waarop de koeling uitstond worden niet getoond.*

				totaal- N	ammonium -N	P	K	droge stof	as	pH	os
				WI 4.25- 115	WI 4.25- 103			WI 4.25- 111	WI 4.25- 112	WI 4.25- 113	
				g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	
23/026 7	gekoelde mest	Hellum	1-2-2023	3,15	1,33	0,50	3,61	75,0	15,7	7,17	59,3
23/026 8	referentie mest			3,67	1,43	0,53	4,04	84,4	22,6	7,32	61,8
23/062 5	gekoelde mest	Hellum	22-3- 2023	3,29	1,24	0,52	3,65	95,5	29,4	7,27	66,1
23/062 6	referentie mest			3,35	1,25	0,58	3,88	107,4	37,1	7,15	70,3
23/091 6	gekoelde mest	Hellum	3-5-2023	3,35	1,27	0,56	3,63	88,6	25,1	7,27	63,5
23/091 7	referentie mest			3,35	1,35	0,51	3,81	75,5	19,0	7,36	56,6
23/131 6	gekoelde mest	Hellum	14-6- 2023	2,04	0,77	0,33	2,62	50,2	11,8	7,42	38,3
23/131 7	referentie mest			2,26	0,94	0,40	3,01	71,2	25,4	7,16	45,8
23/169 6	gekoelde mest	Hellum	19-7- 2023	2,03	0,80	0,35	2,61	57,0	12,6	7,38	44,4
23/169 7	referentie mest			2,62	1,13	0,45	3,26	75,5	27,1	7,23	48,4
23/255 6	gekoelde mest	Hellum	29-11- 2023	3,26	1,20	0,63	3,67	113,7	44,4	7,51	69,4
23/255 7	referentie mest			2,46	1,13	0,41	3,53	54,8	13,3	7,40	41,4
	gekoeld	gem		2,85	1,10	0,48	3,30	80,0	23,2	7,34	56,8
		sd		0,64	0,25	0,12	0,53	24,1	12,6	0,12	12,6
	referentie	gem		2,95	1,20	0,48	3,59	78,1	24,1	7,27	54,0
		sd		0,58	0,18	0,07	0,39	17,3	8,1	0,11	10,8

Tabel 4.6 *Analyseresultaten alle mestmonsters.*

				totaal- N	ammonium -N	P	K	droge stof	as	pH	os
				WI 4.25- 115	WI 4.25- 103			WI 4.25- 111	WI 4.25- 112	WI 4.25- 113	
				g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	
23/026 7	gekoelde mest	Hellum	1-2-2023	3,15	1,33	0,50	3,61	75,0	15,7	7,17	59,3
23/026 8	referentie mest			3,67	1,43	0,53	4,04	84,4	22,6	7,32	61,8
23/062 5	gekoelde mest	Hellum	22-3- 2023	3,29	1,24	0,52	3,65	95,5	29,4	7,27	66,1
23/062 6	referentie mest			3,35	1,25	0,58	3,88	107,4	37,1	7,15	70,3
23/091 6	gekoelde mest	Hellum	3-5-2023	3,35	1,27	0,56	3,63	88,6	25,1	7,27	63,5
23/091 7	referentie mest			3,35	1,35	0,51	3,81	75,5	19,0	7,36	56,6
23/131 6	gekoelde mest	Hellum	14-6- 2023	2,04	0,77	0,33	2,62	50,2	11,8	7,42	38,3
23/131 7	referentie mest			2,26	0,94	0,40	3,01	71,2	25,4	7,16	45,8
23/169 6	gekoelde mest	Hellum	19-7- 2023	2,03	0,80	0,35	2,61	57,0	12,6	7,38	44,4
23/169 7	referentie mest			2,62	1,13	0,45	3,26	75,5	27,1	7,23	48,4
23/207 2	gekoelde mest	Hellum	27-9- 2023	1,50	0,64	0,30	1,95	51,6	22,4	7,42	29,3
23/207 3	referentie mest			3,30	1,26	1,00	3,92	292,4	224,7	7,47	67,7
23/223 7	gekoelde mest	Hellum	18-10- 2023	2,35	0,97	0,43	2,87	61,9	20,0	7,41	41,9
23/223 8	referentie mest			1,85	0,98	0,30	3,20	45,6	17,8	7,57	27,8
23/255 6	gekoelde mest	Hellum	29-11- 2023	3,26	1,20	0,63	3,67	113,7	44,4	7,51	69,4
23/255 7	referentie mest			2,46	1,13	0,41	3,53	54,8	13,3	7,40	41,4
	gekoeld	gem		2,62	1,03	0,45	3,08	74,2	22,7	7,36	51,5
		sd		0,73	0,27	0,12	0,66	23,2	10,7	0,11	14,9
	referentie	gem		2,86	1,18	0,52	3,58	100,8	48,4	7,33	52,5
		sd		0,64	0,17	0,21	0,38	79,6	71,6	0,15	14,4

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



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

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

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

