



Emissies uit verse drijfmest, urine en feces van rundvee, varkens en kalveren

Onderzoek in klimaatrespiratiecellen naar emissies van ammoniak, lachgas, koolstofdioxide, methaan en niet-methaan vluchtige organische componenten, waaronder vluchtige vetzuren

Emma van Boxmeer, Nico Verdoes, Leonie Workel, Jan Vonk, Jos Huis in 't Veld

Rapport 1495



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Emissies uit verse drijfmest, urine en feces van rundvee, varkens en kalveren

Onderzoek in klimaatrespiratiecellen naar emissies van ammoniak, lachgas, koolstofdioxide, methaan en niet-methaan vluchtige organische componenten, waaronder vluchtige vetzuren

Emma van Boxmeer¹, Nico Verdoes², Leonie Workel¹, Jan Vonk¹, Jos Huis in 't Veld¹

¹ Wageningen Livestock Research

² NVEM

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Livestock Research en gesubsidieerd door het ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur, in het kader van beleidsondersteunend onderzoek binnen de KIA, MMIP B1 Emissiereductie methaan veehouderij, met als programmnaam Integraal Aanpakken (projectnummer BO-43-105-061 en BO-43.10-002-031).

Wageningen Livestock Research
Wageningen, juli 2024

Rapport 1495

Van Boxmeer, E.G.G., N. Verdoes, L.D. Workel, J. Vonk, J.W.H. Huis in 't Veld, 2024. Emissies uit verse drijfmest, urine en feces van rundvee, varkens en kalveren; onderzoek in klimaatrespiratiecellen naar emissies van ammoniak, lachgas, koolstofdioxide, methaan en niet-methaan vluchtige organische componenten, waaronder vluchtige vetzuren. Wageningen Livestock Research, Rapport 1495.

In dit onderzoek is bepaald wat het effect van snelle mestverwijdering uit stallen is op de koolstof- en stikstofemissie uit drijfmest, feces en urine van melkvee, varkens en kalveren. Er is weinig informatie over het verloop van de afbraaksnelheid van organische stof en de vorming van methaan in de eerste uren of dagen na excretie. Het onderzoek is uitgevoerd in klimaatrespiratiecellen waarbij CH₄, CO₂, NH₃, N₂O emissies en emissies van niet-methaan vluchtige organische componenten (NMVOC), waaronder vluchtige vetzuren (VVZ) zijn gemeten. Er zijn in het totaal negen verse mestfracties onderzocht: drijfmest, feces en urine van drie diercategorieën (rundvee, varkens en kalveren). Aan de hand van de resultaten van dit onderzoek kan worden geconcludeerd dat met name CO₂ en NH₃ emissies kunnen worden vermeden als mest binnen 8 – 10 uur na uitscheiding uit de stal wordt verwijderd. Ondanks dat in dit onderzoek de emissiepiek van CH₄ en N₂O (en mogelijk NMVOC, waaronder VVZ) niet is waargenomen en deze waarschijnlijk pas later plaatsvindt, wordt de emissie van CH₄ en N₂O bij de verwijdering van mest binnen 8 – 10 uur na uitscheiding ook sterk verminderd vergeleken met de emissiefactoren uit reguliere mest. De biochemisch methaan potentieel (BMP) analyses laten zien dat vooral drijfmest en feces een hoge potentiële biogasproductie hebben.

In this study the effect of rapid manure removal from barns on carbon and nitrogen emissions from manure from dairy cattle, pigs and calves was determined. There is little knowledge about the decomposition rate of organic matter and the formation of methane in the first hours or days after excretion. The research was conducted in climate respiration cells, from which CH₄, CO₂, NH₃, N₂O emissions and emission of non-methane volatile organic compounds (NMVOC), including volatile fatty acids (VFA), were measured. Nine fresh manure fractions were examined: slurry, feces and urine from cattle, pigs and calves. Based on the results of this study, it can be concluded that CO₂ and NH₃ emissions can be reduced by removing the manure from the barn within 8 – 10 hours after excretion. Although the peak in emissions of CH₄ and N₂O (and possibly NMVOC, including VFA) was not observed in this study and probably occurs later, the emission of CH₄ and N₂O can also be greatly reduced when manure is removed from the barn within 8 – 10 hours after excretion compared to the emission factors of regular manure. The Biogenic Methane Potential (BMP) analyses show that slurry and feces have high potential for biogas production.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/662243> 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, 2024

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

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

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

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

Wageningen Livestock Research Rapport 1495

Inhoud

Woord vooraf	5
Samenvatting	7
1 Inleiding	9
1.1 Aanleiding	9
1.2 Doel van het onderzoek	9
1.3 Leeswijzer	10
2 Literatuur: emissies uit (verse) mest	11
2.1 Afbraak organische stof	11
2.1.1 Methaan	12
2.1.2 Vluchtige vetzuren	12
2.2 Ammoniak	13
2.3 Verse mest	14
3 Proefopzet	15
3.1 Klimaatrespiratiecellen (KRC)	15
3.2 Mestfracties en verzameling	16
3.3 Experiment	17
3.4 Behandelingen	18
3.5 Emissiemetingen	19
3.6 Monsternamen en bepalingen	20
3.6.1 Mestmonsters	20
3.6.2 Condens	21
3.6.3 Biochemisch Methaan Potentieel (BMP)	21
3.6.4 Hydrolyse constanten	22
3.6.5 Massabalans stikstof (N) en koolstof (C)	22
4 Resultaten	24
4.1 Analyse mestmonsters	24
4.2 BMP bepaling	25
4.3 Hydrolyse constanten	26
4.4 Emissies per mestfractie	26
4.4.1 Rundvee	26
4.4.2 Varkens	31
4.4.3 Kalveren	33
4.4.4 Cumulatieve emissies	36
4.5 Massabalansen	40
5 Discussie	42
5.1 Meetapparatuur	42
5.2 Broeikasgasemissies	42
5.3 Stikstofemissies	44
5.4 Emissies NMVOC (waaronder VVZ)	45
5.5 BMP en hydrolyse constanten	46
6 Conclusie	48
Literatuur	50
Bijlage 1 Mestkenmerken individuele monsters	54

Bijlage 2	Uitgebreide BMP resultaten	55
Bijlage 3	Datafit hydrolyse constanten vergisting	58
Bijlage 4	Temperatuur van de mest	61

Woord vooraf

In de publiek-private samenwerking (PPS) Next Level Mestverwaarden zijn modellen opgesteld om de emissie van methaan, lachgas en ammoniak te kunnen bepalen in de gehele mestketen vanaf de uitscheiding tot en met de aanwending van mestproducten. Snelle verwijdering van mest uit de stal en het direct gesloten opslaan of verder verwaarden van mest beperkt de methaanverliezen. Maar ook voor de reductie van de ammoniakemissie is het noodzakelijk om de mest en urine zo snel mogelijk te verwijderen uit de stal. Er bleken niet veel betrouwbare gegevens in de literatuur voorhanden om de afbraak van de organische stof (dus methaanvorming) en de emissie van ammoniak in die eerste uren na uitscheiding goed te modelleren. Het snel verwijderen van mest heeft ook in de praktijk veel aandacht. De noodzaak om betrouwbare cijfers te genereren is duidelijk. Omdat binnen de genoemde PPS geen ruimte (meer) was om dit onderzoek gestructureerd op te zetten, heeft het Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur (LVVN) dit thema overgenomen en ondergebracht in het onderzoeksprogramma Integraal Aanpakken. We danken de financier voor deze ruimte en we danken de medewerkers van de onderzoekslocatie Carus in Wageningen voor de hulp bij een goede proefopzet en -uitvoering. In die dank willen we uiteraard ook de veehouders betrekken die de verse mest hebben geleverd voor dit onderzoek.

De auteurs



Samenvatting

Binnen de Publiek-private samenwerking (PPS) NL Next Level Mestverwaarden is met modelberekeningen voor varkens-, vleeskalver- en rundveemest berekend dat naarmate mest sneller uit stallen wordt verwijderd en direct naar een vergistingsinstallatie wordt gebracht, de emissie van methaan in de stal afneemt. Daarnaast kan door het vergisten van verse mest meer biogas worden gewonnen in het vergistingsproces. Zeer snelle verwijdering van mest kan mogelijk ook bijdragen aan een reductie van ammoniakemissies uit de stal. Er is eerder onderzoek gedaan naar emissies uit mest, echter zijn deze onderzoeken uitgevoerd met mest van enkele weken tot maanden oud, zijn de eerste metingen pas na enkele dagen uitgevoerd of worden de resultaten van de eerste uren en dagen niet specifiek weergegeven. Er is dus weinig informatie over het verloop van de afbraaksnelheid van organische stof en de vorming van methaan in de eerste uren of dagen na excretie.

In dit onderzoek is bepaald wat het effect van snelle mestverwijdering uit stallen is op de koolstof- en stikstofemissie uit drijfmest, urine en feces van melkvee, varkens en kalveren. Hiervoor is gebruik gemaakt van kleine mestputten in drie klimaatrespiratiecellen (KRC), welke ieder zijn opgesplitst in twee compartimenten. Van ieder compartiment is zowel de ingaande als uitgaande lucht bemonsterd om continue concentraties van methaan (CH₄) en koolstofdioxide (CO₂) te bepalen. Een Fourier Transform InfraRed spectrometer (FTIR) is gebruikt om continu de concentraties van ammoniak (NH₃), lachgas (N₂O) en niet-methaan vluchtige organische componenten (NMVOC), waaronder vluchtige vetzuren (VVZ), te bepalen. Er zijn negen verse mestfracties onderzocht: drijfmest, feces en urine van rundvee, varkens en kalveren. Tijdens het experiment is de mestput eerst bevuild met oude drijfmest, feces of urine. Vervolgens is verse drijfmest, feces of urine aangebracht in de mestopslagput om hiermee een (bevuilde) dichte vloer of mestopslag te simuleren. Hierbij is uitgegaan van de mestproductie van één dier per dag. Vervolgens zijn de emissies uit de verse mest gedurende drie dagen gemeten. Naast het meten van de emissies zijn voorafgaand en na afloop van de meetperiode de mestvolumes bepaald en zijn mestmonsters genomen en geanalyseerd om massabalansen op te stellen. Ook is het biochemisch methaan potentieel (BMP) bepaald en zijn aan de hand daarvan hydrolyseconstanten berekend.

De resultaten van deze studie laten zien dat de NH₃ emissie uit drijfmest en urine direct na toediening van de verse fracties toenamen. Hierbij was de toename bij de urinefracties sterker dan bij de drijfmestfracties. De NH₃ emissie uit de feces fracties namen na toediening van de verse feces langzaam af. Op basis van literatuur werd verwacht dat de piek in NH₃ emissie eerder plaats zou vinden. Naast dat vele factoren een rol spelen in de vorming en vervluchtiging van ammoniak, kan de handelswijze in de proef een verklaring zijn voor het feit dat de piek in ammoniakemissie later optrad dan verwacht.

De CH₄ en N₂O emissies uit de mestfracties waren laag. De CH₄ emissie uit varkensdrijfmest en -urine en de N₂O emissie uit alle mestfracties namen wel langzaam toe gedurende de meetperiode. De CH₄ emissie van de overige mestfracties was stabiel gedurende de eerste drie dagen na toediening van de verse mest.

De CO₂ emissie uit rundvee- en kalverdrijfmest, rundvee-, varkens- en kalverfeces en kalverurine nam in de eerste uren af, om vervolgens na circa 10 uur na toediening van de verse mest weer te stijgen. Het emissiepatroon uit varkensdrijfmest liet meteen een sterke stijging zien tot 10 uur na toediening van de verse mest. De CO₂ emissie uit rundvee- en varkensurine piekte direct na toediening en nam gedurende de meetperiode verder af. CO₂ uit organische mest telt overigens niet mee als broeikasgas, omdat het deel uitmaakt van de korte koolstofkringloop

De verkennende metingen naar de emissie van NMVOC (waaronder VVZ) laten zien dat uit de kalvermestfracties de meeste koolstof via NMVOC emitteerde, gevolgd door rundvee-urine. Uit de mestfracties van varkens en de rundveedrijfmest en -feces emitteerde ongeveer 3 keer minder koolstof via NMVOC. Wel nam de emissie van NMVOC langzaam toe gedurende de eerste drie dagen na uitscheiding. De samenstelling van NMVOC verschilt per mest- en diercategorie. Gemiddeld kan de C-emissie uit NMVOC, waaronder VVZ, oplopen tot 10 – 23% uit rundveemest, 7 – 16% uit varkensmest en 16 – 62% uit kalvermest ten opzichte van de totale C-emissie uit de mest.

Aan de hand van de resultaten van dit onderzoek kan worden geconcludeerd dat met name NH₃ emissie en emissie van koolstof in de vorm van en CO₂ en NMVOC (waaronder VVZ) kunnen worden vermeden als mest binnen 8 – 10 uur na uitscheiding uit de stal wordt verwijderd. De CH₄ emissie komt in de eerste uren tot dagen na uitscheiding nog niet op gang. Ondanks dat in dit onderzoek de emissiepiek van N₂O (en mogelijk NMVOC) niet is waargenomen en deze waarschijnlijk pas later plaatsvindt, worden deze emissies bij de verwijdering van mest binnen 8 – 10 uur na uitscheiding ook verminderd. Wel moet de verwijderde mest vervolgens direct worden verwerkt (bijvoorbeeld vergist), zodat de vermeden emissies niet alsnog buiten de stal plaatsvinden.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het nationale klimaatdoel is om in 2030 de uitstoot van broeikasgassen met 55% te hebben gereduceerd, om vervolgens in 2050 CO₂ neutraal te zijn (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 2022). Daarnaast moet in 2035 50% van de stikstofemissie worden gereduceerd om de stikstofdepositie op gevoelige gebieden onder de kritische depositiewaarde te krijgen (Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, 2022). Van de totale broeikasgasemissies wordt 16% uitgestoten door landbouw (inclusief tuinbouw), waarvan 67% door veehouderijen (CBS, 2021a). Deze broeikasgasemissies bestaan voor het grootste deel uit methaan (CH₄) en verder lachgas (N₂O). De meeste CH₄ komt vrij bij pens- en darmfermentatie (± 70%, met name bij melkvee) en het resterende deel komt uit dierlijke mest wanneer deze wordt opgeslagen in of buiten de stal. Van de totale ammoniakemissie is 87% afkomstig uit de landbouw, waarbij rundvee met 54% het grootste aandeel heeft (CBS, 2021b).

Deelstudies binnen de PPS NL Next Level Mestverwaarden hebben voor de varkens-, vleeskalver- en rundveehouderij verschillende mestbewerkingsroutes doorgerekend en uit deze resultaten bleek dat naarmate de mest sneller uit de stal kan worden afgevoerd, de emissie van methaan in de stal afneemt (Gollenbeek et al., 2021a, 2021b, 2022). Wanneer mest zo vers mogelijk in een mono-mestvergister wordt gebracht, wordt daarnaast ook meer biogas gewonnen uit het vergistingsproces. Zeer snelle verwijdering van mest kan mogelijk ook bijdragen aan een reductie van de ammoniakemissie uit de stal (Elzing et al., 1992; Aarnink et al., 2019). Op basis van metingen en schattingen (met name uit rundveestallen) is de methaanemissie uit mest in de stal relatief laag, wat duidt op een relatief beperkte omzetting van organische stof in de mestput. Ook bleken metingen en modelberekeningen niet eenduidig overeen te komen (Mosquera et al., 2021). Daarnaast is de biogasopbrengst van vergistingsinstallaties waarin rundveemest van gemiddelde ouderdom wordt vergist lager dan verwacht op basis van de berekende emissies uit de stal, wat doet vermoeden dat een grotere omzetting van organische stof in de mestkelder plaatsvindt.

Er zijn verschillende onderzoeken gedaan naar methaanemissie uit mest (Rodhe et al., 2009; Amon et al., 2006; Misselbrook et al., 2016; Wood et al., 2012; Hilgert et al., 2022), echter zijn deze onderzoeken uitgevoerd met oudere mest, werd de ouderdom van de mest niet vermeld, zijn de eerste metingen pas na enkele dagen uitgevoerd of werden metingen van de eerste dagen niet specifiek weergegeven. Er is dus nauwelijks informatie beschikbaar over de omzettingssnelheid van organische stof in de eerste uren tot dagen na uitscheiding van de mest. De gehanteerde theoretische afbraakcurve van zeer verse mest bleek een groot effect te hebben op de berekende emissies en het verdienmodel (Gollenbeek et al., 2021a, 2021b, 2022). De afbraaksnelheid van organische stof in verse mest beïnvloedt dus vooral de emissies in het begin van de mestketen, maar ook de financiële haalbaarheid voor vergisting. Omdat weinig informatie bekend is over het verloop van de afbraaksnelheid van organische stof en de vorming van methaan in de eerste uren of dagen na excretie is het moeilijk aan te geven of het zinvol is om te streven naar snelle afvoer van mest uit de stallen, zowel vanuit perspectief van emissiereductie, als vanuit het perspectief van de haalbaarheid van mono-vergisting installaties. Er is zowel behoefte aan fundamentele cijfers uit het laboratorium als aan metingen in de (semi-)praktijk.

1.2 Doel van het onderzoek

Het doel van dit onderzoek is te bepalen wat het effect van snelle mestverwijdering uit stallen is op de broeikasgas- en stikstofemissie en de afbraak van organische stof in mest in de eerste uren tot dagen na excretie. Vanwege de haalbaarheid van monovergisting op rundveebedrijven ligt de focus van dit onderzoek voornamelijk op rundveemest, maar vanwege de mogelijke effecten op de emissies vanuit stallen zijn ook varkensmest en kalvermest meegenomen. Het kwantificeren van methaan- en ammoniakemissies en

emissies van eventuele andere vluchtige componenten uit mest als functie van de tijd geeft inzicht in de emissies gedurende de eerste periode na excretie. Hieruit kan worden bepaald of en hoeveel extra biogasproductie mag worden verwacht wanneer deze mest zo vers mogelijk in een vergistingsinstallatie kan worden gebracht. Daarnaast geven de resultaten van dit onderzoek ook verbeterde informatie voor modelberekeningen om emissies uit verse mest en biogasopbrengst in relatie tot ouderdom van de mest te voorspellen.

1.3 Leeswijzer

Allereerst is kort literatuuronderzoek gedaan naar emissies uit (verse) dierlijke mest (Hoofdstuk 2). Hierin is gefocust op vorming en emissie van methaan, ammoniak en vluchtige vetzuren. Vervolgens is in Hoofdstuk 3 beschreven hoe het onderzoek in de klimaatrespiratiecellen is opgezet en uitgevoerd en welke aanvullende analyses zijn gedaan. Hoofdstuk 4 gaat in op de resultaten, namelijk de samenstelling van de mestmonsters, de biogaspotentie van de verse mestfracties met afgeleide hydrolyseconstanten, stikstof- en broeikasgasemissies en emissies van andere vluchtige componenten uit de verschillende mestfracties in de tijd en cumulatief over de meetperiode en massabalansen voor stikstof en koolstof. De resultaten en de proefopzet worden in Hoofdstuk 5 bediscussieerd en hieruit volgen de conclusies (Hoofdstuk 6).

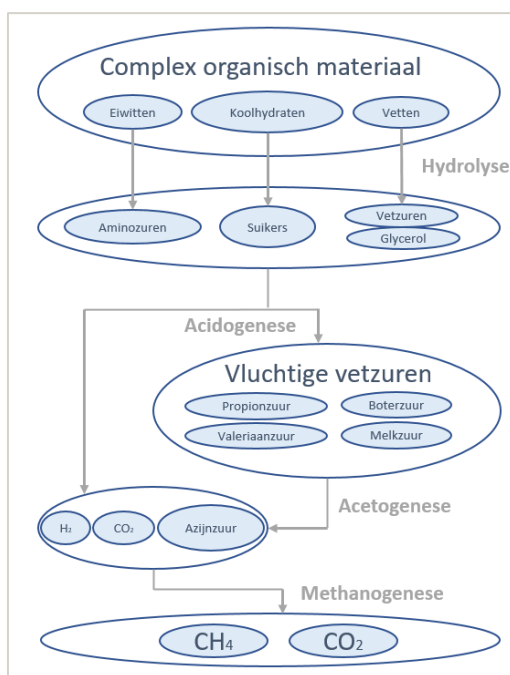
2 Literatuur: emissies uit (verse) mest

Tijdens de afbraakprocessen in dierlijke mest ontstaan gasvormige producten. Deze gasvormige producten kunnen uit de (verse) mest emitteren. De belangrijkste gasvormige producten zijn methaan en ammoniak. Daarnaast spelen ook vluchtige vetzuren een rol. In dit hoofdstuk is op basis van literatuuronderzoek beschreven hoe deze gassen ontstaan in dierlijke mest.

2.1 Afbraak organische stof

Organisch materiaal in mest wordt door micro-organismen afgebroken. Via verschillende tussenstappen is het eindproduct koolstofdioxide (CO₂) en methaan (CH₄). Het werkingsmechanisme bestaat uit vier stappen (Figuur 1):

- 1) Hydrolyse: organische stoffen worden afgebroken tot simpelere monomeren (aminozuren, suikers, vetzuren, glycerol).
- 2) Acidogenese: de monomeren worden afgebroken tot vluchtige vetzuren, met name melkzuur, propionzuur, boterzuur en valeriaanzuur, en waterstof en CO₂.
- 3) Acetogenese: de vluchtige vetzuren worden door acetogene micro-organismen omgezet in azijnzuur, waterstof en CO₂.
- 4) Methanogenese: azijnzuur wordt door methanogene bacteriën omgezet in methaan en CO₂ (CH₃COOH → CH₄ + CO₂).



Figuur 1 Stappen in anaerobe fermentatie van organische materialen, gebaseerd op Tauseef et al., (2013).

De vier stappen zoals hierboven beschreven worden altijd doorlopen wanneer organische stof wordt gefermenteerd onder anaerobe omstandigheden, hetzij in een open of gesloten opslag, in een vergister, of in de pens en/of darmen van een herkauwer. Het gas wat tijdens de methanogenese gevormd wordt, wordt biogas genoemd. Biogas bevat ongeveer 40 – 70% methaan en bestaat voor de rest uit CO₂ en sporen van ammoniak, waterstofsulfide en waterstof (Deublein & Steinhäuser, 2008).

2.1.1 Methaan

Zoals in Hoofdstuk 1 al is genoemd, zijn er verschillende onderzoeken gedaan naar methaanemissie uit mest (Misselbrook et al., 2016; Wood et al., 2012; Hilgert et al., 2022), echter zijn deze onderzoeken uitgevoerd met oudere mest, werd de ouderdom van de mest niet vermeld, zijn de eerste metingen pas na enkele dagen uitgevoerd of worden metingen van de eerste dagen niet specifiek weergegeven. Ook bij onderzoeken specifiek naar emissies uit mestopslagen wordt wel enkele maanden gemeten, maar vindt de eerste meting op zijn vroegst pas enkele dagen na inzet plaats of wordt maar enkele keren per week of per maand gemeten (Rodhe et al., 2009; Amon et al., 2006). Misselbrook et al. (2016) heeft wel continue gemeten aan opslagen met varkens- en runderdrijfmest bij verschillende temperaturen, echter door de lange meetduur (70 dagen) is het verloop in de eerste uren niet goed zichtbaar. Wel lijkt bij beide mestsoorten bij een temperatuur van gemiddeld 17°C een piek in methaanemissie plaats te vinden rond 20 dagen na inzet. Wood et al. (2012) vond deze piek pas na 50 – 70 dagen bij opgeslagen runderdrijfmest en zij denken dat dit te maken heeft met de tijd die nodig is om een voldoende grote populatie methanogene bacteriën op te bouwen. Afhankelijk van hoeveel methanogene bacteriën aanwezig zijn in de gebruikte mest, kan deze piek zich eerder of later voordoen. Hilgert et al. (2022) heeft de methaanemissie uit mestopslagen met rundvee- en varkensmest met verschillende temperaturen gemeten en heeft hierbij redelijk verse mest gebruikt (circa één dag oud). Echter zijn de emissies niet continue gemeten en is het uit de resultaten niet op te maken wat het verloop van de emissies in de eerste uren na toevoeging van de verse mest aan de opslag is.

In paragraaf 1.1 is de vraag benoemd of de schatting van de methaanemissie uit mest in stallen te laag is of dat andere factoren bijdragen aan de snelle terugloop van biogasopbrengst bij vergisting naarmate de ouderdom van mest toeneemt. Dalby et al. (2020) benoemt ook dat methaanschattingen uit modellen niet altijd overeenkomen met de waargenomen emissies in de praktijk. Bestaande modellen voor methaanschattingen uit vloeibare mest nemen groei en activiteit van de bacteriën niet mee en temperatuur, pH, enting met oude mest en verteerbaarheid van organische stof blijkt hier een grote invloed op te hebben. Zo laten Elsgaard et al. (2016) zien dat CH₄ emissie uit rundvee- en varkensdrijfmest een parabolische curve laat zien bij een oplopende temperatuur, welke piekt rondom 35°C. Sommer et al. (2017) laten zien dat aangezuurde drijfmest met een pH van 5,5 leidt tot 62% minder CH₄ emissie vergeleken met drijfmest met een pH van 7,3. Daarnaast is de samenstelling van de bacteriën in mest anders bij een verschillende temperatuur van de mest tijdens opslag (Dalby et al., 2020). Bij lage temperaturen (5 – 20°C) is het aandeel psychrofiële bacteriën het grootst, maar vanaf 20°C nemen mesofiële bacteriën het over. Echter, de CH₄ productie snelheid van psychrofiële bacteriën ligt veel lager dan die van mesofiële bacteriën, wat de CH₄ productie bij lagere temperaturen nog verder verlaagd (Im et al., 2020). Dus zonder specifiek rekening te houden met de bacteriële koloniën in de mest, de effecten van temperatuur en management zal de methaanemissie niet nauwkeurig genoeg geschat kunnen worden.

Om methaanemissies uit stallen te voorkomen, zijn momenteel stalsystemen in ontwikkeling waarbij (drijf)mest dagelijks uit de stal wordt verwijderd. Bij melkveestallen gebeurt dit met een robot of schuif op de roosters of op de dichte vloer, terwijl dit bij varkens en kalveren met een schuif of band onder de roosters gebeurt of door middel van het spoelen van de mestkanalen. Door mest dagelijks uit de stal te verwijderen kan 90% van de methaanemissies uit de stal gereduceerd worden (Van Boxmeer et al., 2023a). Wel is het van belang dat deze mest na verwijdering snel verwerkt wordt, omdat de emissies zich anders verplaatsen naar de mestopslag.

2.1.2 Vluchtige vetzuren

De drie vluchtige vetzuren die het meest in mest voorkomen zijn azijnzuur, boterzuur en propionzuur. Azijnzuur wordt gevormd uit cellulose en hemicellulose, boterzuur voornamelijk uit snelle suikers en propionzuur uit onbestendig zetmeel (Eurofins, 2022a, 2022b, 2022c; Moran, 2005). Er zijn meerdere onderzoeken gedaan naar de aanwezigheid van vluchtige vetzuren in rundvee- en varkensdrijfmest (Tabel 1). De verhouding waarin de verschillende vluchtige vetzuren voorkomen is voor rundvee- en vleesvarkensdrijfmest hetzelfde, alleen vleesvarkensdrijfmest bevat absoluut gezien meer vluchtige vetzuren dan rundveedrijfmest. Aangezien de onverteerbare organische stof die in mest achter blijft vooral bestaat uit celwandmateriaal, ontstaat er voornamelijk azijnzuur tijdens het fermentatieproces (Veen, 2000).

Tabel 1 Hoeveelheden vluchtige vetzuren (gr/kg) in (oude) rundvee- en varkensdrijfmest, gevonden in verschillende literatuur bronnen. Gem. geeft de gemiddelde gevonden waarde per vluchtig vetzuur en Per. geeft in gemiddeld percentage weer in welke hoeveelheid een vluchtig vetzuur voorkomt. NA = niet bepaald.

Literatuurbron	Rundveedrijfmest							Varkensdrijfmest					
	1	2	4	6	7	Gem.	Per.	1	3	5	6	Gem.	Per.
Azijnzuur (C2)	3,5	4,8	5,7	5,5	4,9	4,9	64%	5,8	9,2	7,1	8,0	7,5	63%
Propionzuur (C3)	0,6	1,3	2,0	2,0	1,5	1,5	19%	1,4	2,6	2,3	3,0	2,3	19%
Boterzuur (C4)	0,3	0,9	1,1	1,0	0,3	0,7	10%	0,8	1,5	1,1	1,5	1,2	10%
Iso-boterzuur	0,1	0,2	0,2	NA	0,2	0,2	2%	0,3	NA	NA	NA	0,3	3%
Valeriaanzuur (C5)	0,1	0,1	0,3	0,5	0,1	0,2	2%	0,1	0,8	0,7	0,5	0,5	4%
Iso-valeriaanzuur	0,1	0,3	0,2	NA	0,3	0,3	3%	0,2	NA	NA	NA	0,2	1%
Totaal	7,7 100%							12,0 100%					

¹Cooper & Cornforth (1978), ²Patni & Jui (1985), ³De Buissonjé & Verheijen (2014), ⁴Timmerman et al. (2005), ⁵Timmerman et al. (2009), ⁶Starmans et al. (2015), ⁷Hoeksma (2013)

Versillende onderzoeken hebben aangetoond dat er een relatie bestaat tussen de hoeveelheid vluchtige vetzuren in mest en een onaangename mestgeur, namelijk hoe meer vluchtige vetzuren in de mest, hoe onaangener de geur (Bell, 1970; Page et al., 2015). Williams (1984) concludeerde dat van varkensdrijfmest met meer dan 0,7 gram/liter vluchtige vetzuren verwacht mag worden dat de mestgeur onacceptabel onaangenaam is. Sneath (1988) vond deze grens bij 0,52 gram/liter vluchtige vetzuren en benoemde dat tot 0,23 gram/liter er zich zeker geen geurprobleem zou moeten voordoen. Tijdens anaerobe fermentatie, zowel gecontroleerd tijdens mestvergisting of ongecontroleerd in een opslag of op de vloer, vermindert de hoeveelheid vluchtige vetzuren significant (Timmerman et al., 2005; Page et al., 2014). Het lagere gehalte aan vluchtige vetzuren na fermentatie kan er voor zorgen dat de mestgeur van digestaat minder onaangenaam is dan de geur van drijfmest.

2.2 Ammoniak

Het grootste deel van de uitgescheiden stikstof in urine van varkens en melkvee is ureum (Dijkstra et al., 2013; Aarnink et al., 1995). Ureum uit dierlijke mest kan worden omgezet in ammoniak (NH₃) en het enzym urease, wat onder andere voorkomt in feces, fungeert in deze reactie als katalysator. In de mest vormt ammoniak een evenwicht met ammonium (NH₄⁺) en dit evenwicht wordt bepaald door de pH en de temperatuur. Bij een constante temperatuur leidt een lage pH tot het verschuiven van het evenwicht in de richting van ammonium en vermindert het daarbij ammoniak vervluchtiging (Sommer et al., 2006). Hetzelfde geldt bij een constante pH en een lage temperatuur. Op de plek waar mest in contact staat met de lucht kan ammoniak overgaan naar gasvormige toestand en vervluchtigen (Montes et al., 2009). Het omzettingproces van ureum naar ammonium start direct wanneer feces en urine met elkaar in aanraking komen en de ammoniakemissie piekt binnen enkele uren (Elzing & Monteny, 1997; Béline et al., 1998). Vervolgens neemt de ammoniakemissie geleidelijk af en binnen 24 uur is alle ureum omgezet in ammonium.

Om ammoniakemissies in stallen te voorkomen, zijn momenteel stalsystemen in ontwikkeling waarbij de urine en feces fracties gescheiden worden. Voorbeelden hiervan zijn scheidende vloeren en het koetoilet bij melkvee en mestbanden of -schuiven onder de roosters bij varkens en kalveren. Het doel van deze stalsystemen is om urine en feces zo snel mogelijk apart van elkaar op te slaan, waardoor er bij melkvee circa 25 - 50% en bij varkens en kalveren circa 40 - 85% minder ammoniak emitteert (Van Boxmeer et al., 2023a). De exacte ammoniakemissiereductie per stalstelsel hangt onder andere af van het scheidingsrendement, het emitterend oppervlak, de mate van urease-activiteit op de vloer, de snelheid van verwijdering van de mestfracties en of de opslag van de fracties binnen of buiten de stal plaats vindt.

2.3 Verse mest

De literatuur geeft weinig informatie over de afbraak van organische stof in de eerste uren na excretie. De genoemde onderzoeken en de gegevens uit Tabel 1 zijn allemaal bepaald op basis van oudere rundvee- en varkensdrijfmest (minstens enkele dagen tot maanden oud). Het verloop van de afbraaksnelheid van organische stof en de vorming van methaan en vluchtige vetzuren in de eerste uren tot dagen na excretie is niet bekend. Wel is de ontwikkeling binnen de veehouderij sterk gericht op het snel verwijderen van mest uit de stal om zo emissies te reduceren en het biogasrendement van een vergister te optimaliseren. Een andere ontwikkeling is het aan de bron scheiden van urine en feces, waardoor deze apart opgeslagen en eventueel verwerkt kunnen worden. Echter is weinig bekend over de emissies uit de aan de bron gescheiden fracties.

In dit onderzoek zijn daarom de emissies van ammoniak, broeikasgassen, vluchtige vetzuren en niet methaan vluchtige organische componenten gemeten uit verschillende verse mestfracties om zo een eerste indruk te krijgen wat er in de eerste uren na uitscheiding gebeurt.

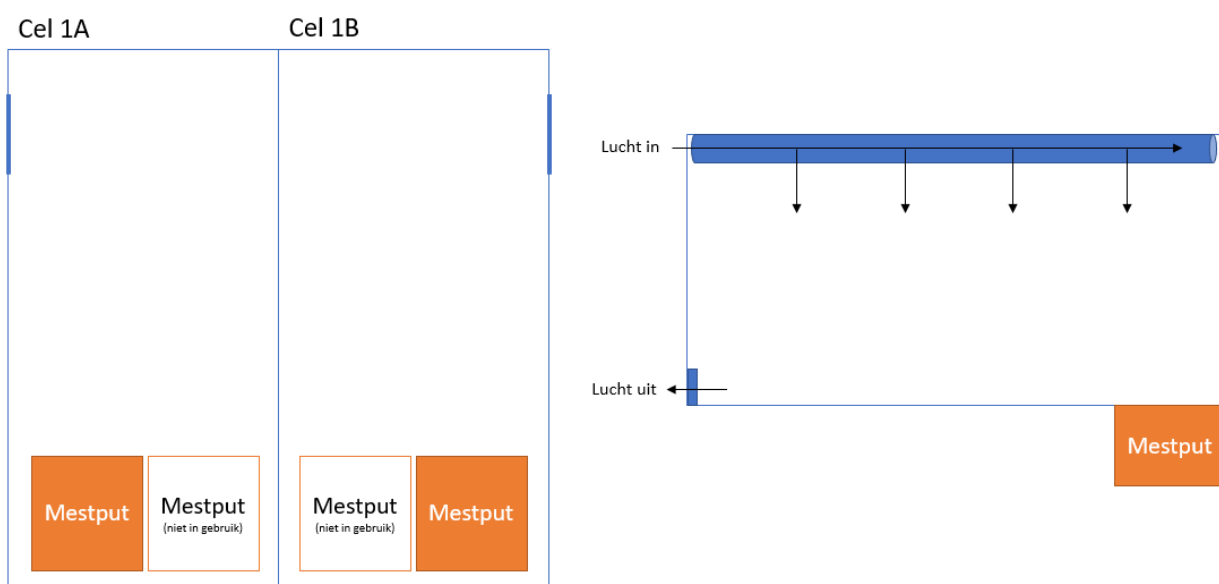
3 Proefopzet

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van de klimaatrespiratiecellen (KRC) op de onderzoekslocatie Carus van Wageningen University & Research in Wageningen. Tijdens het experiment is mest van drie veehouderijbedrijven (melkvee, varkens, kalveren) gebruikt om in de KRC de emissies te meten. Het experiment is uitgevoerd in september 2022.

3.1 Klimaatrespiratiecellen (KRC)

De klimaatrespiratiecellen in de onderzoekslocatie Carus worden vaak gebruikt om de energiestofwisseling (indirecte calorimetrie) van een dier in kaart te brengen en deze informatie wordt gebruikt in onderzoek naar onder andere de interactie tussen klimaat en diervoeding, voeding en gezondheid, broeikasgasemissies en metabolisme van bijvoorbeeld broedeieren. De KRC zijn luchtdicht en de temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en luchtsnelheid kunnen worden gecontroleerd. Het formaat van de cellen kan worden aangepast, zodat hierin een gewenst aantal dieren kan worden gehouden (van één koe tot een groep varkens of kippen). De maximale afmetingen zijn 2,7 x 4,5 meter (inhoud 35 m³), het luchtdebiet kan gevarieerd worden van 100 tot 2.600 l/min, de relatieve luchtvochtigheid van 50 – 90% en de temperatuur van 5 - 45°C. Via flexibele luchtzakken wordt de aangevoerde lucht in de cellen homogeen verdeeld. De buitenwanden en het plafond zijn gemaakt van sandwichpanelen (drie lagen), waarbij laag 1 en 3 bestaan uit gecoat metaal en laag 2 uit polystyreen en zijn aan de binnenkant afgewerkt met multiplex platen met een polyester laag. De betonnen vloer is opgebouwd uit een kern van polystyreen met een chemisch bestendige topcoating. Heetkamp et al. (2015) geven een gedetailleerde omschrijving van de faciliteiten.

Tijdens dit onderzoek zijn drie KRC opgedeeld in elk twee, luchtdichte compartimenten (1A, 1B, 3A, 3B, 4A, 4B). Elk compartiment bevatte twee mestopslagputten van ongeveer 0,6 m³ (1,15 x 1,15 x 0,47 meter) maar tijdens het experiment is slechts één mestput gebruikt (Figuur 2). Tijdens het experiment is de relatieve luchtvochtigheid en temperatuur in de KRC gemeten met automatische sensoren en daarnaast werd vanuit elk compartiment continue het luchtdebiet gemeten. Zowel de ingaande als uitgaande lucht werd bemonsterd om de concentraties CH₄, CO₂ en O₂ te bepalen. Het lichtregiem was ingesteld op schemerdonker (continue).



Figuur 2 Bovenaanzicht (links) en zijaanzicht (rechts) van klimaatrespiratiecellen.

3.2 Mestfracties en verzameling

Er zijn negen mestfracties onderzocht: rundvedrijfmest (RD), rundveefeces (RF), rundvee-urine (RU), varkensdrijfmest (VD), varkensfeces (VF), varkensurine (VU), (vlees)kalverdrijfmest (KD), (vlees)kalverfeces (KF), (vlees)kalverurine (KU). Tijdens het experiment is de mest aangebracht in één van de mestopslagputten in een compartiment van de KRC (Figuur 2) om hiermee een dichte vloer of mestopslag te simuleren. Er is gepoogd om in de mestopslagputten een luchtstroming te realiseren die overeenkomst met de luchtstroom over de stalvloer of over de bovenste laag mest in een mestopslag. Tijdens het experiment zijn twee stalsystemen nagebootst:

Snelle afvoer drijfmest

In de rundveehouderij hebben deze stalsystemen vaak een dichte stalvloer. Urine en feces vallen op de dichte vloer en worden vervolgens elk uur door middel van een mestrobot of -schuif afgevoerd naar een afstort met opslag. In de kalver- en varkenshouderij gebeurt ongeveer hetzelfde, echter dan onder de roosters.

Scheiding urine en feces

Bij primaire scheiding van urine en feces in de rundveehouderij wordt urine afgevoerd via een giergoot of door giergaten. Vaak wordt deze urine opgeslagen in de kelder, waar al oudere urine aanwezig is. In deze proef is een stalsysteem nagebootst waar de urine direct weg kan lopen naar de kelder. In de kalver- en varkenshouderij worden vaak mestbanden of -schuiven onder de roosters gebruikt waarbij de urine naar één kant van de stal loopt en dan wordt opgeslagen in een aparte opslag buiten de stal. De feces worden met een mestrobot of -schuif van de dichte vloer verzameld (wederom bij melkvee op de stalvloer en bij varkens en kalveren op de vloer onder de roosters).

Op basis van de hierboven beschreven stalsystemen zijn bij drie bedrijven mest(fracties) opgehaald. Het volume van de mestfracties (Tabel 2) zoals deze zijn toegediend in de mestput in de KRC zijn gebaseerd op het leef- en kelderoppervlak in de praktijk, de mestproductie per dier per dag, de verhouding tussen feces en urine in drijfmest en de oppervlakte van de mestput in de KRC (1,3 m²). Van de negen mestfracties is zowel een oude fractie als een verse fractie verzameld (Tabel 3).

Tabel 2 *Bepaling van het volume van de toegediende mestfracties op basis van leefoppervlak, kelderoppervlak en mestproductie, afgeleid uit Handboek Kwantitatieve Informatie Veehouderij (KWIN, 2022), Handboek Melkveehouderij (Remmelink et al., 2020) en Ellen & Buissonje (2015).*

	Koe	Varken	Kalf
Leefoppervlak (m ²)	10	1,0	1,6
Kelderoppervlak (m ²)	5,5	0,4	1,6
Mestproductie (l/dag)	65	3,5	7,5
Verhouding urine : feces in drijfmest	5:8	4:3	2:1
Feces productie (l/dag)	40	1,5	2,5
Urine productie (l/dag)	25	2,0	5,0
Drijfmest per 1,3 m² (l)	16	11,5	6,0
Feces per 1,3 m² (l)	9,5	5,0	2,0
Urine per 1,3 m² (l)	6,0	6,5	4,0

De mestfracties van melkvee zijn verzameld bij de melkkoeien die op dat moment aanwezig waren op de proeflocatie Carus in Wageningen. Deze koeien waren gehuisvest op een gangbare roostervloer, waarbij urine en feces samen in de mestkelder verzameld worden. Oude drijfmest is (na mixen) uit de kelder geschept. Urine en feces zijn voorafgaand aan het experiment opgevangen achter de koeien, waarna de fracties in open emmers zijn opgeslagen tot zij nodig waren voor het experiment. Op deze manier zijn oude feces en urine 'gemaakt'.

De mestfracties van varkens zijn verzameld bij Zonvarken in De Heurne. Op dit bedrijf wordt de feces opgevangen op mesttegels onder de roosters. De urine zakt door de tegels heen en stroomt naar één kant om vanuit daar in een mestzak opgeslagen te worden. Oude feces en urine zijn uit de opslagen gehaald en

oude drijfmest is zelf gemaakt door oude feces en oude urine te mengen in de juiste verhouding. De verzamelde mest was een mix van circa 75% vleesvarkensmest gemengd met 25% mest van kraamzeugen.

De mestfracties van kalveren zijn verzameld bij kalverhouderij Maatschap Brouwer – Hardeman in Barneveld. Op dit bedrijf vallen feces en urine door de roosters heen, waarna de urine wegloopt naar één kant en de feces worden verzameld met een mestschuif. Oude feces en urine zijn uit de opslagen gehaald en oude drijfmest is zelf gemaakt door oude feces en oude urine te mengen in de juiste verhouding. Het betreft blankvleeskalveren.

Tabel 3 Omschrijving van de genomen mestmonsters en de hoeveelheid toegediende mest in de mestopslagputten van de klimaatrespiratiecellen.

	Oude mestfracties		Verse mestfracties	
	Beoogd volume per cel	Locatie	Beoogd volume per cel	Locatie
Rundvee		Reguliere roostervloer		Reguliere roostervloer
• Drijfmest	16 liter	Mestkelder (na mengen)	6,5 liter urine + 9,5 liter feces	Vers opgevangen feces en urine gemengd tot drijfmest
• Feces	9,5 liter	Opgevangen achter koe, 1,5 ^e week in open emmers bewaard	9,5 liter	Opgevangen achter koe
• Urine	65 liter	Opgevangen achter koe, 1,5 ^e week in open emmers bewaard	6,0 liter	Opgevangen achter koe
Varkens		Mesttegels onder de roosters		Mesttegels onder de roosters
• Drijfmest	5,0 liter feces + 6,5 liter urine	Oude feces en urine gemengd tot drijfmest	5,0 liter feces + 6,5 liter urine	Vers opgevangen feces en urine gemengd tot drijfmest
• Feces	5,0 liter	Uit feces opslag (container)	5,0 liter	Opgevangen achter varken of opgeraapt van rooster direct na uitscheiding
• Urine	6,5 liter	Uit urine opslag (mestzak)	6,5 liter	Opgevangen achter/onder varken
Kalveren		Mestschuif onder de roosters		Mestschuif onder de roosters
• Drijfmest	2,0 liter feces + 4,0 liter urine	Oude feces en urine gemengd tot drijfmest	2,0 liter feces + 4,0 liter urine	Vers opgevangen feces en urine gemengd tot drijfmest
• Feces	2,0 liter	Uit opslag	2,0 liter	Opgevangen achter kalf of opgeraapt van rooster direct na uitscheiding
• Urine	4,0 liter	Uit opslag	4,0 liter	Opgevangen achter/onder kalf

Verse urine en feces fracties zijn voor alle diercategorieën opgevangen door tijdens het moment van uitscheiding met een pannetje aan een stok de feces of urine achter of onder het dier op te vangen. Vervolgens zijn de mestfracties zo snel mogelijk opgeslagen in zuurkoolvaten en gekoeld in koelboxen met koelelementen. Verse drijfmest is handmatig gemaakt door vers opgevangen feces en urine samen te voegen en goed te mengen in de verhouding volgens Tabel 2. Hierna is de drijfmest zo snel mogelijk toegediend in de mestopslagput in de KRC, om te voorkomen dat een groot deel van de emissies plaatsvond buiten de KRC.

3.3 Experiment

Het experiment bestond in totaal uit drie weken. Eerst zijn de mestputten (deels) gevuld met oude mest (drijfmest, feces, urine). De gebruikte volumes per mestfractie zijn weergegeven in Tabel 3. Na vier dagen is het grootste deel van de oude mest uit de mestput verwijderd, zodat een bevuild oppervlak over bleef (Figuur 3). De verse mest is bemonsterd en vervolgens in de bevuilde mestputjes aangebracht, om zo een dichte vloer te simuleren. De mestvolumes zijn gebaseerd op de dagproductie van één dier, wat resulteerde in een mesthoogte in de put variërend van 0,2 tot 1,2 cm (met uitzondering van rundvee-urine). Na 68 uur is de mest opnieuw bemonsterd en is de put leeggehaald en schoongemaakt. Gedurende de hele week zijn CO₂, CH₄, NH₃, N₂O emissies en emissies van NMVOC (waaronder VVZ) gemeten.

Voor rundvee-urine is een urineopslag in plaats van een dichte vloer nagebootst. De mestput is gevuld met een grote hoeveelheid oude urine (Tabel 3, mesthoogte circa 5 cm) en in tegenstelling tot de andere mestfracties is deze put niet geleegd, maar is de verse urine op de oude urine aangebracht.



Figuur 3 Mestopslagput met rundveedrijfmest waaruit de meeste 'oude' mest is verwijderd om een bevuilde vloer na te bootsen. Hierop is vervolgens de verse mest aangebracht waarna de emissiemetingen zijn gestart.

3.4 Behandelingen

In Tabel 4 is per mestfractie de ingestelde temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en luchtsnelheid in de KRC weergegeven. In rundveestallen is de temperatuur gemiddeld 15°C, echter wordt verwacht dat bij snelle afvoer van de mest deze niet volledig af zal koelen tot 15°C. Daarnaast kan de temperatuur een grote invloed hebben op de emissies die uit de mest komen (Hilgert et al., 2022). Daarom is voor rundveedrijfmest naast een behandeling met 15°C ook een behandeling met 20°C uitgevoerd. In de varkenshouderij ligt de temperatuur (onder de roosters) doorgaans hoger (20°C) en bij kalveren juist lager (15°C) doordat meer luchtstroming onder de roosters plaatsvindt.

De proef met rundveedrijfmest is drie keer herhaald om omgevingsfactoren zo veel mogelijk uit te sluiten. Vooral voor rundveedrijfmest zijn betrouwbare afbraakdata nodig in verband met het steeds vaker toegepaste mono-vergisten van verse mest (Melkvee100plus, 2023). De proeven met rundveefeces en -urine zijn twee keer herhaald, omdat deze systemen in de praktijk nog minder vaak voorkomen. In de kalver- en varkenshouderij komen stalsystemen met primaire scheiding nog minder vaak voor dan in de rundveehouderij, omdat alle mest vaak van het bedrijf moet worden afgevoerd. Daarom zijn de proeven met kalver- en varkensdrijfmest twee keer herhaald en met urine en feces één keer gedaan.

Tabel 4 Behandelingen per week per KRC compartiment. Rundveedrijfmest (RD), rundveefeces (RF), rundvee-urine (RU), varkensdrijfmest (VD), varkensfeces (VF), varkensurine (VU), (vlees)kalverdrijfmest (KD), (vlees)kalverfeces (KF), (vlees)kalverurine (KU).

Cel	Mestfractie	Temperatuur (°C)	Luchtvochtigheid (%) [*]	Luchtsnelheid (m/s)
Proefweek 1				
1A	RD	15	65	0,2
1B	RD	15	65	0,2
3A	RD	15	65	0,2
3B	RD	20	65	0,2
4A	RD	20	65	0,2
4B	RD	20	65	0,2
Proefweek 2				
1A	VD	20	85	0,1
1B	VD	20	85	0,1
3A	VU	20	85	0,1
3B	VF	20	85	0,1
4A	RF	15	85	0,2
4B	RF	15	85	0,2
Proefweek 3				
1A	KD	15	85	0,1
1B	KD	15	85	0,1
3A	KU	15	85	0,1
3B	KF	15	85	0,1
4A	RU	15	85	0,2
4B	RU	15	85	0,2

^{*}In de eerste proefweek is de relatieve luchtvochtigheid ingesteld op 65%, echter bleek de laag mest dan snel in te drogen en daarom is besloten vanaf proefweek twee de luchtvochtigheid te verhogen naar 85%.

3.5 Emissiemetingen

Bij alle compartimenten zijn gedurende de 4 dagen voor en minimaal 68 uur na toediening van de verse mest de CO₂, CH₄, NH₃ en N₂O emissies en emissies van vluchtige vetzuren (mierenzuur, azijnzuur, propionzuur, boterzuur, valeriaanzuur) en niet-methaan vluchtige organische componenten (propanol, isopropanol, ethylacetaat, propylacetaat, acetaldehyde en ethanol) gemeten. Hiermee is bepaald hoeveel emissies uit de oude mestfracties komen (10 uur voor toediening van de verse mest) en hoeveel uit de verse mestfracties.

De meetapparatuur (Advance Optima modular system, ABB) in de KRC hebben van zowel de ingaande als uitgaande lucht de concentraties CO₂, O₂ en CH₄ bepaald. Vanuit elk compartiment is ook continue het luchtdebiet gemeten. De concentratie van de individuele gassen is uitgedrukt in liter standaard droog volume, wat betekent dat is gecorrigeerd naar 0°C, 1013 mBar en voor de partiële waterdruk. De gassen zijn continue gemeten, waarbij de meetapparatuur elke 3 minuten van cel wisselt en in een cyclus ook twee keer 3 minuten de buitenlucht meet. Er is per cel dus elke 24 minuten een meting uitgevoerd. Voor de start van dit onderzoek is een CO₂ recovery test uitgevoerd ter validatie van het systeem (Tabel 5). De recovery ligt bij voorkeur tussen 97% en 103% (Mesgaran et al., 2020). De streefwaarde van de recovery van de KRC op Carus is ±1% en dit is bij bijna alle cellen gehaald.

Daarnaast zijn NH₃ gehalten gemeten met twee verschillende Dräger Polytron sensoren, waarbij één sensor heeft gemeten in cel 1A en 1B en de andere sensor in cel 3A, 3B, 4A en 4B. De nauwkeurigheid van deze meting is echter lastig in te schatten, omdat de sensoren relatief traag reageren. Het meten van het NH₃ gehalte in de ingaande (buiten)lucht duurt nog langer. Hierdoor zou een langere meetcyclus nodig zijn om deze waarde nauwkeurig in te schatten, maar daardoor is het niet mogelijk om in alle cellen in de eerste minuten na toediening van de verse mest te meten.

Tabel 5 *CO₂ recovery test ter validatie van het meetsysteem in de KRC. De streefwaarde is 100 ± 1% recovery.*

Cel	Datum	CO ₂ recovery (%)
1A	17-08-2022	99,61
1B	18-08-2022	100,61
3A	16-08-2022	99,74
3B	18-08-2022	99,76
4A	16-08-2022	101,39
4B	17-08-2022	100,67

Aanvullend zijn met een FTIR (Fourier Transform InfraRed spectrometer, type DX400) de CO₂, CH₄, NH₃, N₂O gehalten en gehalten aan vluchtige vetzuren en niet-methaan vluchtige organische componenten in de uitgaande lucht gemeten. De gassen zijn continue gemeten, waarbij de meetapparatuur elke 3 minuten van cel wisselt. Er is per cel dus elke 18 minuten een meting uitgevoerd. Binnen een meetperiode van 3 minuten zijn 9 waarnemingen van 20 seconden gedaan, waarvan steeds de eerste waarneming is verwijderd vanwege het spoelen van de meetcel. De data werden geanalyseerd met het bijbehorende softwareprogramma Calcmet versie 12.202. Voor CH₄ en NH₃ werden op het apparaat zelf bepaalde referentiespectra gebruikt. Referenties voor de vluchtige vetzuren (mierenzuur, azijnzuur, propionzuur, boterzuur, valeriaanzuur) en niet-methaan vluchtige organische componenten (propanol, isopropanol, ethylacetaat, propylacetaat, acetaldehyde en ethanol) waren afkomstig uit een generieke bibliotheek. Omdat voor deze componenten in het lab van WLR geen standaarden voorhanden zijn, kon deze meting niet geverifieerd worden. Hoewel een aantal monsters zijn genomen met het oog op veldvalidatie, leverden de gaschromatografische analyses geen bruikbare resultaten op. Om die reden zijn de hier gepresenteerde resultaten van indicatieve aard.

Vanwege de nauwkeurige meting van CO₂ en CH₄, maar de onnauwkeurigheid van de NH₃ sensoren in de KRC is tijdens de dataverwerking gekozen om de CO₂ en CH₄ metingen van de KRC te gebruiken en de NH₃ (en N₂O, vluchtige vetzuren en niet-methaan vluchtige organische componenten) metingen van de FTIR. Daarnaast bleek dat er in de eerste meetweek problemen waren met de background bepalingen van de FTIR ten aanzien van N₂O en niet-methaan vluchtige organische componenten (NMVOC), waaronder vluchtige vetzuren (VVZ). De FTIR corrigeert voor instrument- en omgevingsinvloeden door het maken van een spectrum met nulgas (N₂). Dit spectrum wordt de background of achtergrond genoemd en wordt feitelijk van de metingen afgetrokken. Als hierdoor delen van het gemeten spectrum negatief dreigen te worden stelt de software deze op nul. Hoewel later een andere background ingerekend kan worden, kan dit laatste niet ongedaan meer worden gemaakt. De door de FTIR gemeten N₂O en NMVOC concentraties van deze eerste meetweek zijn daarom niet meegenomen.

De door de KRC gemeten gasconcentraties zijn uitgedrukt in L/dag en door de FTIR gemeten concentraties in ppm. Met de volgende vergelijkingen zijn de gasconcentraties omgerekend naar emissies:

$$Emissie (mg/uur) = concentratie (L/dag) * soortelijke massa (kg/m^3) * 1.000/24 \quad (1)$$

$$Emissie (mg/uur) = (concentratie (ppm) * molmassa/22,4) * ventilatie (m3/uur) \quad (2)$$

3.6 Monsternamen en bepalingen

3.6.1 Mestmonsters

Per behandeling zijn op twee momenten mestmonsters genomen: 1) van de verse mestfractie vlak voor toediening in de mestopslagput en 2) van de verzamelde mest uit de mestopslagput na de meetperiode van circa 68 uur. De mestmonsters zijn vervolgens door het laboratorium van Wageningen Livestock Research geanalyseerd op DS (droge stof, NEN 7432:1998 nl), as (NEN 7432:1998 nl), N-totaal (totaal stikstof, NEN 7434:1998 nl), N-ammoniak (ammoniak stikstof, NEN 7438:1998 nl), fosfor (NEN 7435:2019 nl), kalium (NEN 7436:1998 nl) en pH (NEN 6411:1981 nl NEN-EN-ISO 10523:2012). Het fosfor gehalte is omgerekend naar fosfaat en het kalium gehalte is omgerekend naar kali door te vermenigvuldigen met respectievelijk 2,291 en 1,205. De feces fracties zijn na de meetperiode uit de put geschept en met een vloertrekker zijn de laatste resten verwijderd en is het gewicht van de feces fractie bepaald. De drijfmest en urine fracties zijn met behulp van een waterstofzuiger uit de put gezogen. Om alle resten uit de put te verwijderen is water

gebruikt, waardoor de mestmonsters zijn verdund. De hoeveelheid water is gewogen, om vervolgens het gewicht van de drijfmest of urine fractie te kunnen bepalen. Om de mestkenmerken van de verdunde mest met elkaar te kunnen vergelijken, zijn de analyseresultaten van deze mestmonsters teruggerekend naar een monster zonder toegevoegd water.

3.6.2 Condens

Tijdens de meetperiode in de KRC is ook ammoniak uit de cel-lucht opgenomen door condens in het ventilatiesysteem. Deze stikstof verlaat het systeem wel, maar wordt niet waargenomen door de meetapparatuur. Om dit verlies te kunnen bepalen is gedurende de meetperiode het condenswater opgevangen. Aan het eind van elke meetperiode is het gewicht van het opgevangen condens bepaald en is een monster genomen. Het condenswater is door het laboratorium van Wageningen Livestock Research geanalyseerd op ammoniumstikstof (N-mineraal) en pH. Het N-verlies (in gram) via het condens is berekend met de volgende vergelijking:

$$N_{condens}(gr) = \text{gewicht monster (kg)} * N_{mineraal} (gr/kg) \quad (3)$$

3.6.3 Biochemisch Methaan Potentieel (BMP)

Het doel van een Biochemisch Methaan Potentieel (BMP) test is om het maximale methaanpotentieel van een substraat te bepalen. Dit geeft aan welk deel van de organische stof in mest potentieel wordt omgezet in methaan. De BMP bepaling van de verschillende verse mestfracties is uitgevoerd door LeAF BV. De BMP test is uitgevoerd onder standaard "ideale" laboratoriumcondities bij 35°C. Het standaardinoculum van LeAF bevat voldoende methanogene activiteit om eventuele remming van methaanvorming door ophoping van intermediären tijdens de afbraak te voorkomen. De testresultaten geven het maximale biogaspotentieel onder de toegepaste laboratoriumcondities. De gasopbrengst die in de praktijk met hetzelfde substraat verkregen wordt, is afhankelijk van de toegepaste procescondities. De gasopbrengst kan in de praktijk zowel hoger als lager uitvallen dan in het laboratorium.

De monsters van de verse mestfracties voor BMP bepaling zijn genomen vlak voordat de verse mest is toegediend in de klimaatcellen. De monsters zijn in goed afgesloten potten direct gekoeld en binnen enkele uren naar LeAF gebracht. Daar zijn de monsters kort opgeslagen bij 4°C, waarna ze dezelfde dag zijn ingezet in het bovenstaande proces. Tabel 6 laat zien welke mestfracties en hoeveel monsters per mestfractie getest zijn. Voorafgaand aan de BMP test zijn de pH, het droge stof gehalte en het organische stof gehalte bepaald. De pH is gemeten met een dagelijks gekalibreerde pH-elektrode. Het gehalte droge stof en organische stof zijn bepaald volgens de standaardmethode met droging van de monsters bij 105°C en verassing bij 550°C (NEN 7432:1998 nl).

Tabel 6 Mestfracties en aantal monsters waarvan een BMP test is ingezet.

Week/serie	Mestfractie	Aantal
1	Runderdrijfmest	3
2	Varkendrijfmest	2
	Varkensfeces	1
	Varkensurine	1
	Runderfeces	2
3	Kalverdrijfmest	2
	Kalverfeces	1
	Kalverurine	1
	Runderurine	2

De BMP bepaling vond anaeroob plaats en is per mestmonster in duplo uitgevoerd. De testen zijn uitgevoerd in 1 liter flessen met een totaal vloeistofvolume van 200 ml. Het entmateriaal bestond uit digestaat uit de slibvergister van RWZI Ede. Een controletest zonder substraat is uitgevoerd om te kunnen corrigeren voor endogene biogasproductie uit het entmateriaal. Aan alle flessen zijn macronutriënten, sporenelementen en een fosfaatbuffer toegevoegd. De testen zijn uitgevoerd bij 35°C, de eerste twee weken onder continue menging op een schudbak (100 rpm). Vanaf de derde week zijn de flessen periodiek handmatig gemengd.

Voor aanvang van de testen is de gasfase van alle flessen vervangen door stikstofgas. Gedurende de test werd de gasproductie regelmatig gevolgd met behulp van een drukmeetsysteem. Ook is de samenstelling van het biogas (gehaltes methaan en koolstofdioxide) bepaald met een gaschromatograaf.

De twee varkensdrijfmestmonsters uit week 2 waren erg inhomogeen, waardoor er grote verschillen in biogasproductie ontstonden. Toen bleek dat dit niet meer bijtrok, is besloten om voor beide monsters een extra analyse in te zetten. Deze extra monsters zijn drie weken na het inzetten van de serie ingezet. De klonten in het monster waren inmiddels uit elkaar gevallen, waardoor het materiaal homogener was geworden.

3.6.4 Hydrolyse constanten

In emissiemodellen worden hydrolyseconstanten gebruikt om de methaanemissie te berekenen. In dit onderzoek zijn aan de hand van de methaanproductie tijdens de BMP bepaling (paragraaf 3.3.3) de hydrolyse constanten voor de verschillende mestfracties tijdens vergisting bepaald.

De afbraaksnelheid van organisch materiaal kan worden beschreven met een eerste orde afbraak:

$$C(t) = C_{afbraak} \cdot e^{(-k_h \cdot t)} \quad (4)$$

waarin $C(t)$ de hoeveelheid afbreekbaar organisch materiaal dat na tijdstip t is overgebleven is (gram), $C_{afbraak}$ is de totale hoeveelheid afbreekbaar organisch materiaal (% van totaal organisch materiaal), k_h is de eerste orde afbraakconstante (of hydrolyse constante) en t is de tijd (in dagen). De methaanproductie kan worden berekend op basis van de volgende vergelijking:

$$CH_4(t) = CH_{4,max} \cdot \left(1 - \frac{1}{1+k_h \cdot t}\right) \quad (5)$$

Waarin $CH_4(t)$ de methaanproductie op tijdstip t is (ml CH_4 /gram organische stof), $CH_{4,max}$ is de potentiële methaanopbrengst van het materiaal (ml CH_4 /gram organische stof), k_h is wederom de hydrolyse constante en t is de tijd (in dagen). Vergelijkbaar met de methode uit Timmerman et al. (2009) is met de kleinste kwadraten methode vergelijking 4 gefit op de hoeveelheid geproduceerde methaan. Uit deze fit volgen de hydrolyse constante en de theoretische maximale methaanproductie.

3.6.5 Massabalans stikstof (N) en koolstof (C)

Aan de hand van de samenstelling van de mest, de hoeveelheid mest die in de cel is toegevoegd en aan het eind van de meetperiode is overgebleven en de gemeten emissies, kunnen massabalansen voor stikstof (N) en koolstof (C) worden opgesteld.

De N-massabalans is opgebouwd uit:

- De ingaande hoeveelheid stikstof in de aangebrachte verse mest (N-in)
- De geëmitteerde hoeveelheid stikstof in de vorm van NH_3 (N- NH_3 emissie)
- De geëmitteerde hoeveelheid stikstof in de vorm van N_2O (N- N_2O emissie)
- De hoeveelheid stikstof die is opgevangen in het condenswater in het ventilatiesysteem (N-condens)
- De overgebleven hoeveelheid stikstof in de resterende mest na de meetperiode (N-uit)

N-in en N-uit zijn bepaald aan de hand van de hoeveelheid toegediende mest en het stikstofgehalte van de mestfracties. De NH_3 en N_2O emissies zijn bepaald aan de hand van de emissiemetingen van de FTIR over de gehele meetperiode en deze emissies zijn omgerekend naar hoeveelheid stikstof (N). Het stikstof in het condenswater is bepaald zoals omschreven in 3.3.2. Om de stikstof balans kloppend te krijgen, zou N-uit gelijk moeten zijn aan het verschil tussen N-in en de som van de uitgaande stikstofstromen (emissies van NH_3 , N_2O en het stikstof in het condens). Het verschil is berekend met de volgende vergelijking:

$$Verschil = N_{in} - N_{uit} - (N, NH_3 + N, N_2O + N_{condens}) \quad (6)$$

Vervolgens is bepaald hoeveel procent dit verschil is ten opzichte van de ingebrachte hoeveelheid stikstof (N-in).

De C-massabalans is opgebouwd uit:

- De ingaande hoeveelheid koolstof op basis van het organische stof gehalte van de aangebrachte verse mest (C-in)
- De geëmitteerde hoeveelheid koolstof in de vorm van CO₂ (C-CO₂ emissie)
- De geëmitteerde hoeveelheid koolstof in de vorm van CH₄ (C-CH₄ emissie)
- De geëmitteerde hoeveelheid koolstof in de vorm van NMVOC (C-vluchtig)
- De overgebleven hoeveelheid koolstof op basis van het organische stofgehalte van de resterende mest na de meetperiode (C-uit).

C-in en C-uit zijn bepaald aan de hand van de hoeveelheid toegediende mest en het droge stof en as gehalte van de mestfracties. Het organische stof gehalte van de mest is berekend met de volgende vergelijking:

$$Koolstof = (droge\ stof - as) * C_{gehalte\ organische\ stof} \quad (7)$$

Waarbij OS het organische stof gehalte (g/kg) is, DS het droge stof gehalte (g/kg) en C_{gehalte organische stof} het percentage koolstof in organische stof (58%).

De CO₂ en CH₄ emissies zijn bepaald aan de hand van de emissiemetingen van de KRC en de NMVOC emissies zijn bepaald aan de hand van de emissiemetingen van de FTIR. Deze emissies over de gehele meetperiode zijn omgerekend naar hoeveelheid koolstof (C). Om de C-balans koppend te krijgen, zou C-uit gelijk moeten zijn aan het verschil tussen C-in en de som van de uitgaande koolstofstromen (emissies van CO₂, CH₄, NMVOC). Het verschil is berekend met de volgende vergelijking:

$$Verschil = C_{in} - C_{uit} - (C_{CO_2} + C_{CH_4} + C_{vluchtig}) \quad (8)$$

Vervolgens is bepaald hoeveel procent dit verschil is ten opzichte van de ingebrachte hoeveelheid koolstof (C-in).

4 Resultaten

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van het onderzoek in de KRC en de aanvullende analyses beschreven. Het verschil tussen de emissies uit rundveedrijfmest van 15°C en 20°C is statistisch getoetst. Vanwege de beperkte steekproefomvang van de andere fracties zijn deze niet op significantie getoetst. Allereerst wordt ingegaan op de samenstelling van de mestmonsters. Daarnaast wordt de biogaspotentie uit de verse mestfracties weergegeven en worden uit deze gegevens hydrolyse constanten afgeleid. Vervolgens worden de ammoniak- en broeikasgasemissies en emissies van andere vluchtige componenten uit de verschillende fracties weergegeven in de tijd en cumulatief over de meetperiode weergegeven. Als laatste is per mestfractie een stikstof en koolstof massabalans opgesteld.

4.1 Analyse mestmonsters

De gemiddelde kenmerken van de verschillende mestfracties zijn weergegeven in Tabel 7 en de kenmerken van de individuele mestmonsters staan in Bijlage 1. De mestfracties van varkens bevatten de hoogste concentraties droge stof, organische stof, stikstof, fosfaat en kali, gevolgd door de rundveefracties en de kalverfracties bevat de laagste concentraties. Van elke diercategorie bevat de fecesfractie de meeste droge stof, organische stof en fosfaat en vooral de urine fractie van rundvee bevat veel kali. Verder bevatten de urine fracties nagenoeg geen fosfaat. De pH van de urine fracties is hoger dan van de drijfmest en feces fracties en de rundvee- en varkensurine hebben daarnaast een relatief hoog N-ammonium gehalte.

Tabel 7 Gemiddeld droge stof, as, organische stof, N-totaal, N-ammonium, fosfaat en kali gehalte in g/kg en pH van runderdrijfmest (RD), runderurine (RU), runderfeces (RF), varkensdrijfmest (VD), varkensurine (VU), varkensfeces (VF), kalverdrijfmest (KD), kalverurine (KU) en kalverfeces (KF) op 15 of 20°C.

		Droge stof	As	Organische stof	N-totaal	N-ammonium	Fosfaat	Kali	pH
RD15	Vers	108	19	89	4,0	0,5	1,5	4,2	7,4
	Na 3 dagen	107	26	81	3,7	1,0	1,5	7,5	7,7
RD20	Vers	107	18	89	4,2	0,7	1,6	4,7	7,3
	Na 3 dagen	102	24	78	3,5	0,9	1,5	7,4	7,4
RU15	Oud (put)	44	30	14	2,3	2,0	0,0	15,4	9,2
	Vers	52	29	23	4,6	3,9	0,1	12,9	9,4
	Na 3 dagen	45	30	15	2,0	1,7	0,0	16,0	9,1
RF15	Vers	131	17	114	4,1	0,5	2,4	0,7	6,9
	Na 3 dagen	199	30	169	7,1	1,4	4,0	1,2	8,0
VD20	Vers	127	22	105	6,0	2,4	4,0	3,4	7,7
	Na 3 dagen	113	22	91	4,5	1,6	3,8	4,2	7,1
VU20	Vers	13	7	6	2,5	2,0	0,4	2,9	8,9
	Na 3 dagen	12	8	4	1,0	0,6	0,3	3,6	8,1
VF20	Vers	281	41	240	7,9	0,8	9,1	2,0	7,6
	Na 3 dagen	271	44	227	8,0	1,0	8,7	3,6	7,8
KD15	Vers	87	12	75	4,5	1,6	1,3	2,9	8,0
	Na 3 dagen	89	16	73	3,1	0,6	1,3	4,4	8,1
KU15	Vers	13	7	6	1,8	0,2	0,2	3,0	8,9
	Na 3 dagen	15	10	5	0,6	0,2	0,3	4,2	8,9
KF15	Vers	180	12	168	5,1	0,2	2,5	1,1	6,8
	Na 3 dagen	172	14	158	4,8	0,3	2,6	1,4	7,1

In de meeste gevallen is het droge stof in de verse mestfracties hoger dan in de mestfracties na drie dagen, terwijl het as-gehalte juist hoger is na drie dagen. Dit wijst op organische stofafbraak. Daarnaast is het totale stikstofgehalte van de verse mest hoger dan diezelfde mest na drie dagen, wat wijst op

ammoniakemissie. Het fosfaatgehalte lijkt tijdens de meetperiode niet veel te veranderen, alleen bij runderfeces is een duidelijk verhoogd fosfaatgehalte te zien na drie dagen. Dit kan mogelijk te maken hebben met de monsternamen, omdat het bij feces lastiger is een representatief monster te verkrijgen. Het kali gehalte lijkt tijdens de meetperiode toe te nemen en ook de pH neemt over het algemeen iets toe gedurende de meetperiode. De pH van urine (circa 8 – 9) is hoger dan die van drijfmest en feces.

De uitgangsmest (vers) van RD15 en RD20 was hetzelfde en dit is ook terug te zien in de analysesresultaten, deze zijn vergelijkbaar. Na 3 dagen is bij beide behandelingen het droge stof, organische stof en stikstof gehalte gedaald. Dit verschil is voor RD20 groter dan voor RD15, wat erop wijst dat er bij 20°C meer organische stof is afgebroken dan bij 15°C.

4.2 BMP bepaling

Voordat de monsters zijn getest is de pH, het droge stof gehalte en het organische stof gehalte bepaald (Bijlage 2, Tabel B2.1). De pH gemeten door LeAF lijkt iets lager te liggen dan de pH gemeten door het laboratorium van Wageningen Livestock Research, maar het droge stof en organische stof gehalte komen over het algemeen overeen met de analysesresultaten zoals in paragraaf 4.1 omschreven.

In Tabel 8 is een samenvatting van de BMP testresultaten weergegeven. Het verloop van de biogasproductie van de verschillende mestfracties is weergegeven in Bijlage 2. Uit de resultaten blijkt dat de biogasproductie uit de verschillende mestproducten varieert van 229 tot 524 Nm³/ton OS. Hierbij geven kalverfeces en varkensdrijfmest de hoogste biogasproductie en kalverurine en runderurine de laagste biogasproductie. Over het algemeen geven feces fracties meer biogasproductie dan drijfmestfracties. Opvallend is de hoge biogasproductie uit varkensurine (468 Nm³/ton OS). Echter uitgedrukt in per ton (nat) substraat komt de productie van biogas uit varkensurine als één van de laagste uit (3,0 Nm³/ton substraat). De overige mestfracties laten een vergelijkbare verdeling zien, waarbij de ene fractie soms iets hoger uitvalt dan de andere. De gemiddelde biogasproductie per ton (nat) substraat varieert van 1,8 tot 104 Nm³. Het biogas uit de urine fracties bevat procentueel het meeste methaan (68 – 70%). Het biogas uit de fecesfracties bevat over het algemeen het minste methaan (59 – 61%). Alleen biogas uit kalverdrijfmest bestaat voor enkel 55% uit methaan. Het methaan uit biogas uit runder- en varkensdrijfmest varieert van 62 – 64%.

Tabel 8 Samenvatting van de BMP testresultaten. Gemiddelde biogasproductie in Nm³ biogas per ton ingaand substraat-OS en per ton ingaand nat gewicht substraat.

Week	Cel	Monster	Biogasproductie		
			Nm ³ /ton OS	Nm ³ /ton substraat	% CH ₄
1	1A	Runderdrijfmest	382 ± 1,1	34 ± 0,1	64
	3A	Runderdrijfmest	409 ± 0,5	40 ± 0,1	64
	4A	Runderdrijfmest	369 ± 3,5	36 ± 0,3	64
2	1A	Varkensdrijfmest ¹	412 ± 45	39 ± 4,3	62
	1B	Varkensdrijfmest ¹	485 ± 39	48 ± 3,1	62
	3A	Varkensurine	468 ± 18	3,0 ± 0,1	68
	3B	Varkensfeces	450 ± 15	104 ± 3,3	61
	4A	Runderfeces	441 ± 17	51 ± 2,0	59
	4A	Runderfeces	423 ± 13	47 ± 1,4	59
3	1A	Kalverdrijfmest	393 ± 6,5	28 ± 0,5	55
	1B	Kalverdrijfmest	418 ± 14	23 ± 0,8	56
	3A	Kalverurine	229 ± 4,5	1,8 ± 0,0	70
	3B	Kalverfeces	524 ± 1,1	88 ± 0,2	59
	4A	Runderurine ²	305 ± 3,8	8,2 ± 0,1	70
	4A	Runderurine ²	298 ± 3,5	7,6 ± 0,1	69

¹ Na 3 weken opnieuw ingezet vanwege verschillen in biogasproductie in de duplo vanwege het inhomogene monster

² Doorgaan t/m dag 105.

4.3 Hydrolyse constanten

De maximale methaanproductie en hydrolyse constante tijdens vergisting zijn weergegeven in Tabel 9. De datafits waaruit deze gegevens zijn afgeleid staan in Bijlage 3. Hoe hoger de hydrolyse constante, des te sneller het organisch materiaal wordt afgebroken. Bij varkens- en kalvermest worden de hoogste hydrolyse constanten gevonden bij feces (respectievelijk 0,13 en 0,14), gevolgd door drijfmest (respectievelijk 0,07 en 0,12). Bij rundveemest is dit precies andersom en is de hydrolyse constante van drijfmest het hoogst (gemiddeld 0,15). Voor alle drie de diercategorieën geldt dat de urine fractie de laagste hydrolyse constante heeft (varkens- en kalverurine 0,02), waarbij rundvee-urine hiervan de laagste is (gemiddeld 0,00014). Wel zit er een groot verschil tussen beide rundvee-urine waarnemingen, echter zijn beide beduidend lager dan de urinefracties van varkens en kalveren.

Tabel 9 Maximale methaanproductie, hydrolyse constante (k_h), standaard afwijking (SD) en het aantal analyses per monster.

Behandeling	Maximale methaanproductie	Hydrolyse constante (k_h)	SD	Aantal analyses per monster
RD 1A	545	0,15		2
RD 3A	563	0,17		2
RD 4A	553	0,13		2
RD (gemiddeld)	553	0,15	0,02	6
RU 4A	12.178	0,00027		2
RU 4B	569.949	0,00001		2
RU (gemiddeld)	291.064	0,00014	0,0001	4
RF 4A	528	0,13		2
RF 4B	514	0,11		2
RF (gemiddeld)	521	0,12	0,01	4
VD 1A	485	0,14		3
VD 1B	591	0,11		3
VD (gemiddeld)	538	0,13	0,01	6
VU 3A	1.111	0,02		2
VF 3A	539	0,14		2
KD 1A	596	0,05		2
KD 1B	535	0,09		2
KD (gemiddeld)	566	0,07	0,02	4
KF 3A	626	0,13		2
KU 3A	535	0,02		2

4.4 Emissies per mestfractie

4.4.1 Rundvee

Koolstofdioxide (CO₂)

De CO₂ emissies stijgen sterk als er verse mestfracties worden toegediend (t=0), ten opzichte van de emissies uit de oude mest die voor de toediening gemeten werden (Figuur 4, links). De emissies uit rundveefeces en -drijfmest nemen binnen enkele uren weer af om vervolgens na respectievelijk 20 en 30 uur opnieuw toe te nemen tot 1.700 mg/uur en 2.200 mg/uur. Daarna nemen de emissies geleidelijk af tot 1.500 mg/uur en 2.000 mg/uur aan het eind van de meetperiode. Rundvee-urine laat een afwijkend emissiepatroon zien. Wel piekt de emissie uit rundvee-urine na het toevoegen van de verse urine (de oude urine was niet weggehaald), maar de emissie daalt langzaam en stijgt niet weer opnieuw. De CO₂ emissie uit rundveefeces is over de gehele meetperiode lager dan uit rundvee-urine en grotendeels lager dan uit rundveedrijfmest. Uit rundvee-urine zijn de CO₂ emissies tot 30 uur na toediening van de verse urine hoger

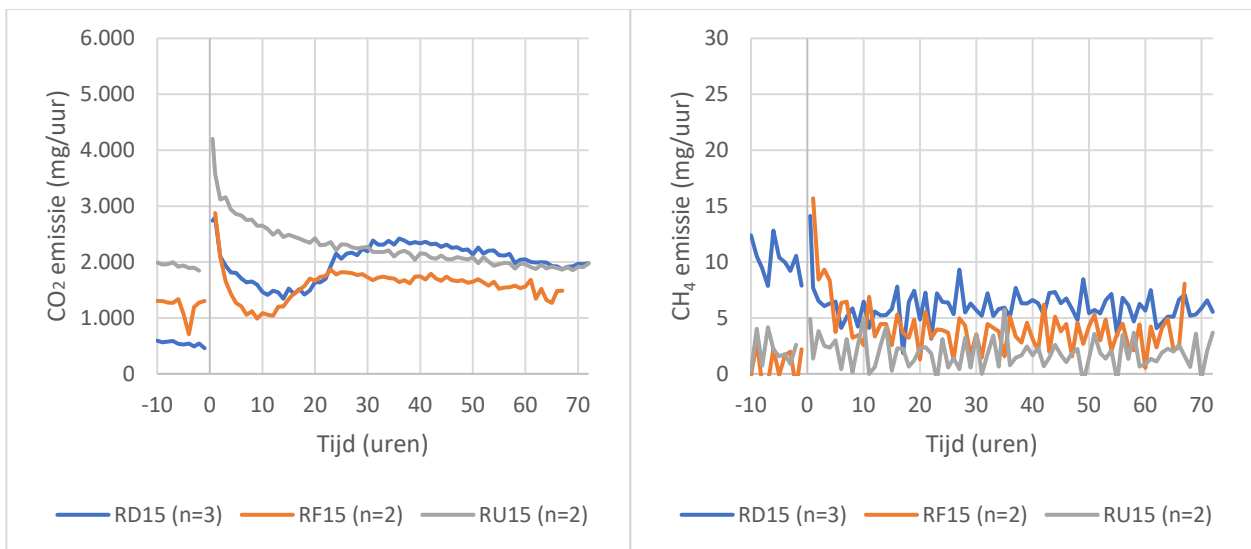
dan de CO₂ emissies uit drijfmest, echter daarna dalen ze onder niveau van drijfmest om aan het eind van de meetperiode op ongeveer hetzelfde niveau uit te komen (2.000 mg/uur).

De CO₂ emissie uit alle mestfracties is uit de oude mest/urine (voor t=0) lager vergeleken met de emissies na het toedienen van de verse mest/urine. De CO₂ emissie uit oude rundveefeces was hoger dan die van oude rundveedrijfmest en de emissie uit oude rundvee-urine was het hoogst.

Methaan (CH₄)

Het CH₄-emissiepatroon is grillig, maar ondanks dit grillige verloop lijkt de CH₄ emissie in de eerste 72 uur na toediening voor alle fracties redelijk stabiel (Figuur 4, rechts). Alleen de CH₄ emissie uit rundveefeces lijkt gedurende de meetperiode licht af te nemen. De CH₄ emissies uit rundveedrijfmest zijn het hoogst, gevolgd rundveefeces en de CH₄ emissies uit rundvee-urine zijn het laagst.

De CH₄ emissie uit oude rundveedrijfmest (voor t=0) is hoger dan na het toedienen van de verse drijfmest, terwijl de CH₄ emissie uit oude rundveefeces juist lager is dan na het toedienen van de verse feces. De CH₄ emissie uit rundvee-urine is vergelijkbaar voor en na het toevoegen van de verse urine.



Figuur 4 Gemiddelde koolstofdioxide (CO₂) en methaan (CH₄) emissies uit rundveedrijfmest (RD15), rundveefeces (RF15) en rundvee-urine (RU15) van 15°C. Op tijdstip 0 is de oude mest/urine uit de mestput verwijderd en is verse mest/urine toegevoegd.

Ammoniak (NH₃)

Na toediening van de verse mest (op t=0) nemen de NH₃ emissies uit rundveedrijfmest en rundvee-urine sterk toe (Figuur 5, links). De NH₃ emissie uit rundveedrijfmest piekt na circa 35 uur en stabiliseert hier om 50 – 70 uur na toediening langzaam iets af te nemen. De NH₃ emissie uit rundvee-urine piekt na circa 25 uur en neemt vervolgens gedurende de rest van de meetperiode geleidelijk af. Het emissiepatroon van rundveefeces wijkt iets af. De NH₃ emissie uit rundveefeces piekt niet na toediening en neemt gedurende de meetperiode alleen maar verder af.

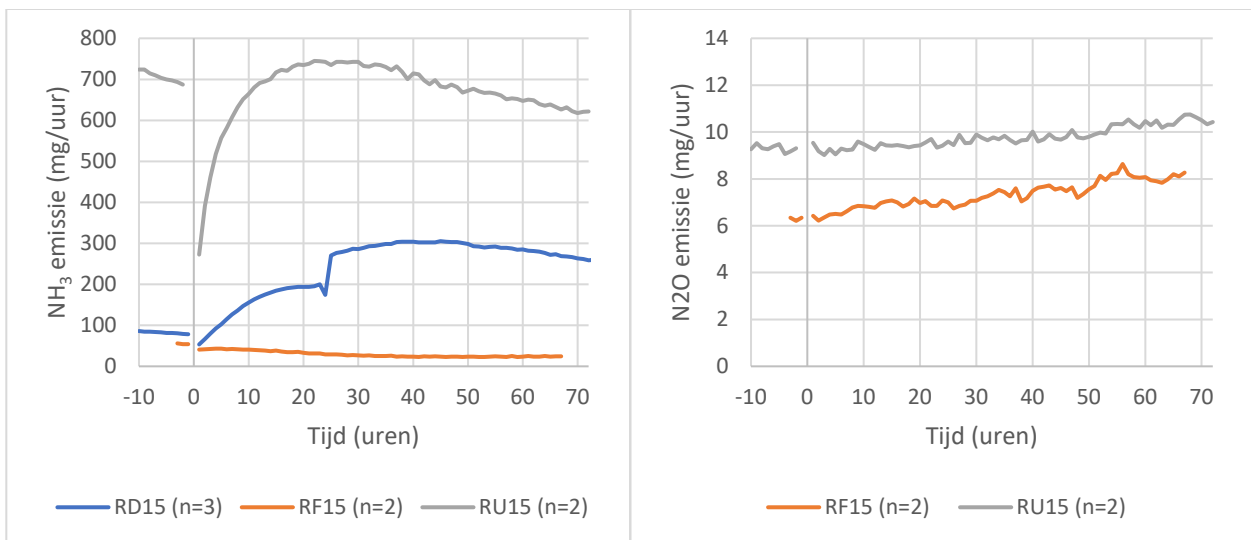
De NH₃ emissie uit rundvee-urine is verreweg het hoogst en piekt op 750 mg/uur. Uit rundveefeces emitteert het minste NH₃ (maximaal 40 mg/uur) en de emissies uit rundveedrijfmest liggen hier tussenin (piekt op 300 mg/uur). De NH₃ emissies waren voor alle mestfracties hoger uit de oude fracties (voor t=0) dan direct na het toedienen van de verse mest. De emissies uit rundveedrijfmest is enkele uren na het toedienen van de verse drijfmest weer op hetzelfde niveau en stijgt daarna nog verder. Bij rundvee-urine (opslag) duurt het circa 12 uur voordat de NH₃ emissies op het niveau is van voor de toevoeging van de oude urine, maar dit is wel bijna op het hoogste punt van de emissiepiek. De NH₃ emissie uit rundveefeces daalt, waardoor deze gedurende de meetperiode lager blijft dan voor toediening van de verse feces.

Na circa 24 uur is bij de NH₃ emissie uit rundveedrijfmest een dip zichtbaar. Dit is waarschijnlijk het resultaat van een aanpassing aan de meetapparatuur (nieuwe nulling, zie Hoofdstuk 3.5), waar achteraf voor is gecorrigeerd. Toch heeft dit wel zichtbaar effect gehad op de meting, waardoor het eerste deel van de meting meer lijkt te zijn gecorrigeerd dan na de nulling op circa 24 uur na toediening. Dit zou kunnen komen

doordat de ammoniakconcentratie bij de klimaatcellen hoger was dan in de lab-omstandigheden waar de FTIR in eerste instantie is gekalibreerd.

Lachgas (N₂O)

Na toedienen van de verse mest/urine (t=0) stijgt de N₂O emissie van zowel rundveefeces als rundvee-urine licht gedurende de meetperiode (Figuur 5, rechts). De N₂O emissie uit rundvee-urine (maximaal 11 mg/uur) is hoger dan uit rundveefeces (maximaal 9 mg/uur). Voor beide fracties geldt dat de emissie uit de oude mest/urine (voor t=0) vergelijkbaar is met direct na het toedienen van de verse mest/urine. In verband met problemen met de background van de FTIR is de N₂O en NMVOC (waaronder VVZ) meting in week 1 niet gelukt (zie ook Hoofdstuk 3.5), waardoor alleen de resultaten van rundveefeces en rundvee-urine getoond kunnen worden.



Figuur 5 Gemiddelde ammoniak (NH₃) en lachgas (N₂O) emissies uit rundveedrijfmest van 15°C (RD15) en 20°C (RD20), rundveefeces (RF15) en rundvee-urine (RU15). Op tijdstip 0 is de oude mest/urine uit de mestput verwijderd en is verse mest/urine toegevoegd.

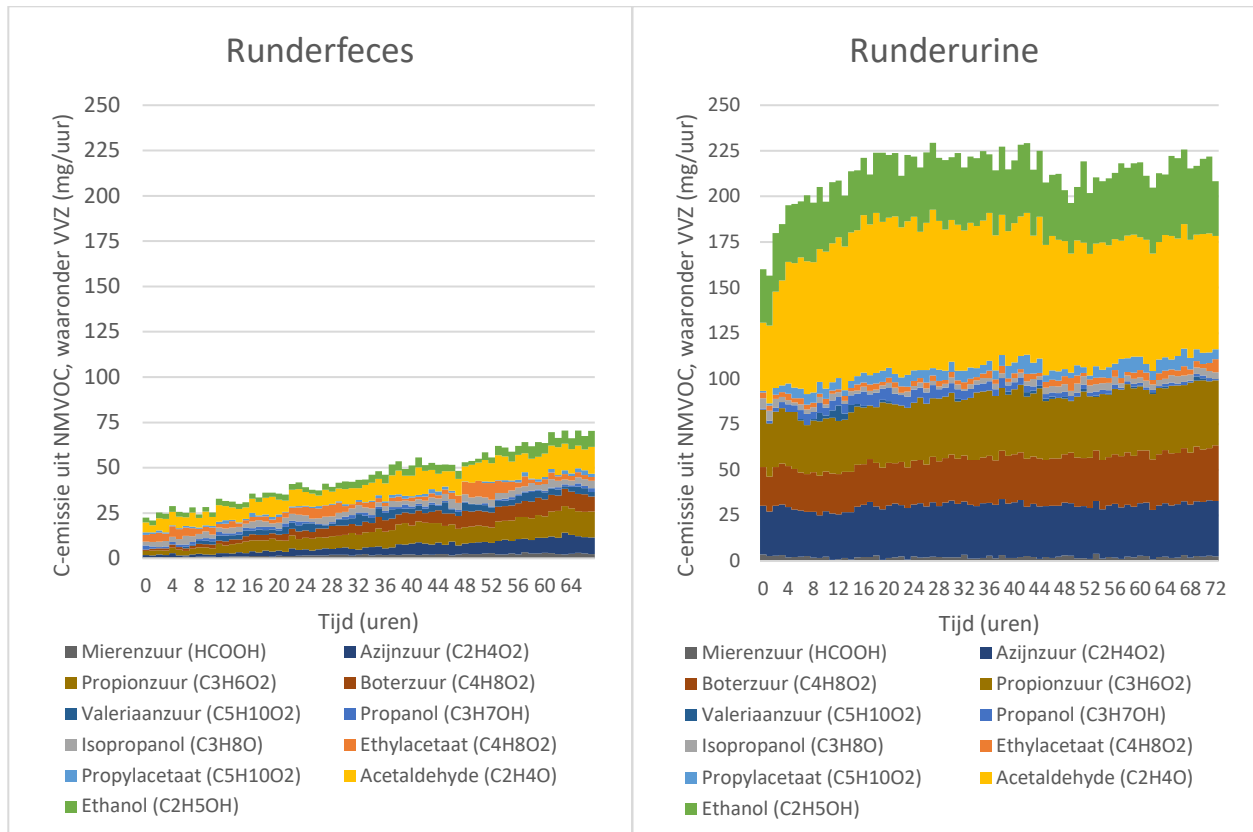
Niet-methaan vluchtige organische componenten (NMVOC), waaronder vluchtige vetzuren (VVZ)

De emissie van NMVOC (waaronder VVZ) neemt na het toedienen van de verse rundveefeces langzaam toe van circa 20 mg vanaf toediening tot 70 mg in het 72^e uur na toediening van de verse feces (Figuur 6, links). Na het toedienen van de verse urine (Figuur 6, rechts) neemt de emissie toe van circa 150 mg vanaf toediening tot 225 mg in het 27^e uur na toediening van de verse urine. Daarna lijkt de emissie af te nemen, maar dit blijft schommelen tot het einde van de meetperiode. De emissie van NMVOC uit rundvee-urine is beduidend hoger dan uit rundveefeces.

Tabel 10 Gemiddelde samenstelling en koolstof (C)-emissie uit niet-methaan vluchtige organische componenten, waaronder vluchtige vetzuren, uit rundveefeces (RF15) en -urine (RU15) van 15°C over de gehele meetperiode (indicatief).

	Concentratie (ppm)		C-emissie (mg/uur)		C-emissie (%)	
	RF15	RU15	RF15	RU15	RF15	RU15
Propanol (C ₃ H ₇ OH)	0,08	0,05	1,2	3,7	3	2
Ethylacetaat (C ₄ H ₈ O ₂)	0,02	0,08	3,7	3,1	8	1
Isopropanol (C ₃ H ₈ O)	0,04	0,15	3,2	3,0	7	1
Acetaldehyde (C ₂ H ₄ O)	0,59	0,65	9,5	72,3	21	34
Propylacetaat (C ₅ H ₁₀ O ₂)	0,05	0,03	1,1	5,6	2	3
Ethanol (C ₂ H ₅ OH)	0,26	0,28	4,1	35,0	9	17
Azijnzuur (C ₂ H ₄ O ₂)	0,15	0,32	4,7	28,3	10	13
Boterzuur (C ₄ H ₈ O ₂)	0,08	0,18	5,4	25,2	12	12
Mierenzuur (HCOOH)	0,11	0,25	1,8	2,1	4	1
Propionzuur (C ₃ H ₆ O ₂)	0,14	0,38	8,3	33,3	18	16
Valeriaanzuur (C ₅ H ₁₀ O ₂)	0,03	0,08	2,9	0,8	6	0
Totaal	1,54	2,44	45,6	212,3	100	100

De samenstelling van de vluchtige vetzuren en het aandeel van de verschillende vluchtige vetzuren op de C-emissie staat weergegeven in Tabel 10. Daaruit blijkt dat uit rundveefeces vooral acetaldehyde vervluchtigt, gevolgd door ethanol, azijnzuur, mierenzuur en propionzuur. De meeste C-emissie vindt plaats uit acetaldehyde, ethanol, azijnzuur, boterzuur en propionzuur. Er vindt bijna geen emissie plaats van ethylacetaat, propylacetaat en valeriaanzuur. Uit rundvee-urine vervluchtigt vooral veel acetaldehyde, gevolgd door ethanol, azijnzuur en propionzuur. De meeste C-emissie vindt plaats uit acetaldehyde, ethanol, azijnzuur, boterzuur en propionzuur. Er vindt bijna geen emissie plaats van ethylacetaat en valeriaanzuur.



Figuur 6 Indicatieve koolstof (C) emissie van niet-methaan vluchtige organische componenten (NMVOC), waaronder vluchtige vetzuren (VVZ), in milligram per uur uit rundveefeces (links) en rundvee-urine (rechts).

Effect temperatuur op emissies uit rundveedrijfmest

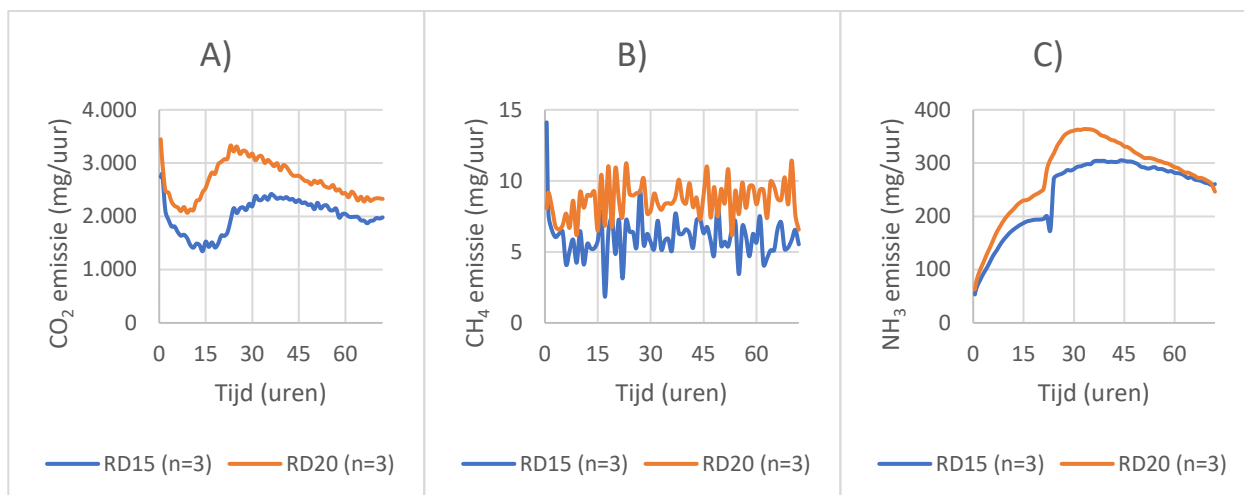
In week 1 is de temperatuur van cellen 1A, 1B en 3A ingesteld op 15°C en van 3B, 4A en 4B op 20°C. De gemiddelde mesttemperatuur van de mest in cel 1A en 3A was 15,2°C. De temperatuur van de mest in cellen 3B, 4A en 4B was lager dan de ingestelde 20°C en daarbij wijkt de temperatuur van de mest in cel 3A daarbij nog wat verder af naar beneden (zie Bijlage 4). Gemiddeld was de temperatuur van de mest in cellen 3B, 4A en 4B 19,0°C.

Een hogere mesttemperatuur geeft een hogere emissie gedurende de meetperiode voor zowel CO₂, CH₄ en NH₃ (Figuur 7). De CO₂ emissies uit rundveedrijfmest van 20°C (RD20) piekt net als rundveedrijfmest van 15°C (RD15) direct na toediening van de verse drijfmest, echter is de piek van RD20 hoger dan die van RD15. Beide emissies nemen daarna af, om vervolgens weer te opnieuw te pieken. De CO₂ emissie uit RD20 piekt na circa 20 uur op 3.000 mg/uur, terwijl de CO₂ emissie uit RD15 pas na 35 uur piekt op 2.300 mg/uur. Wel lijkt de CO₂ emissie bij 20°C na de piek sneller af te nemen dan bij 15°C.

Het CH₄ emissiepatroon is wederom grillig, maar ondanks het grillige verloop lijkt de CH₄ emissies in de eerste 72 uur na toediening redelijk stabiel. Voor rundveedrijfmest van 15°C stabiliseert dit rond gemiddeld 6 mg/uur, terwijl dit voor rundveemest van 20°C rond 8 - 9 mg/uur ligt.

De NH₃ emissies beginnen voor beide temperaturen op ongeveer hetzelfde niveau (circa 65 mg/uur). Vervolgens stijgt de emissie bij 20°C harder dan bij 15°C. De NH₃ emissie bij 20°C piekt na circa 30 uur op 360 mg/uur, terwijl de NH₃ emissie bij 15°C minder sterk piekt na 40 uur op 300 mg/uur). De NH₃ emissie

bij 20°C neemt wel sterker af dan bij 15°C en aan het eind van de meetperiode zijn beide emissies op een vergelijkbaar niveau (250 mg/uur).



Figuur 7 Gemiddelde emissie van CO₂ (A), CH₄ (B), en NH₃ (C) in mg/uur voor rundveedrijfmest van 15°C (RD15) en 20°C (RD20).

De gemiddelde emissies van zowel CO₂, CH₄ en NH₃ uit rundveedrijfmest van 20°C zijn dus hoger vergeleken met de emissies uit rundveedrijfmest van 15°C. Met een enkelzijdige ongepaarde t-toets is bepaald of de emissies van rundveedrijfmest bij 20°C (RD20) hoger zijn dan bij 15°C (RD15). Dit is gedaan voor de cumulatieve CO₂, CH₄ en NH₃ emissies op 2, 6, 12, 24, 48 en 72 uur na toediening van de verse mest (Tabel 11). De groepsgrootte voor elk groep was 3, namelijk voor RD15 de metingen uit cel 1A, 1B en 3A en voor RD20 uit cel 3B, 4A en 4B.

Tabel 11 Gemiddelde cumulatieve CO₂, CH₄ en NH₃ emissie (± standaard deviatie) in gram uit rundveedrijfmest bij 15°C (RD15) en 20°C (RD20) en het verschil (absoluut en procentueel) op 2, 6, 12, 24, 48 en 72 uur na toediening van de verse mest.

Tijd (uren)	RD15		RD20		Verskil t.o.v. RD15	
CO₂						
2	7,6	± 1,2	7,8	± 2,0	0,2	3%
6	14,9	± 0,5	16,9	± 1,5	2,0	13% *
12	24,1	± 0,4	29,8	± 0,4	5,7	24% *
24	43,4	± 1,2	64,1	± 4,7	20,7	48% *
48	98,1	± 1,6	135,6	± 10,2	37,5	38% *
72	147,2	± 3,6	194,4	± 13,7	47,2	32% *
CH₄						
2	0,03	± 0,01	0,02	± 0,00	- 0,01	-33%
6	0,05	± 0,02	0,05	± 0,00	0,00	0%
12	0,08	± 0,03	0,10	± 0,01	0,02	25%
24	0,15	± 0,04	0,21	± 0,02	0,06	40%
48	0,30	± 0,07	0,42	± 0,06	0,12	40% *
72	0,44	± 0,08	0,63	± 0,08	0,19	43% *
NH₃						
2	0,2	± 0,03	0,3	± 0,00	0,1	20% *
6	0,6	± 0,10	0,8	± 0,02	0,2	33% *
12	1,6	± 0,20	2,0	± 0,20	0,4	25% *
24	3,9	± 0,32	5,0	± 0,87	1,1	28%
48	11,1	± 0,56	13,3	± 2,00	2,2	20%
72	17,8	± 0,91	20,3	± 2,49	2,5	14%

* verschil is significant (p<0,05).

Twee uur na toediening van de verse mest (tijdstip 0) is de cumulatieve CO₂ emissie van RD20 0,2 gram (3%) hoger dan RD15, maar dit is niet significant (p=0,45). 6, 12, 24, 48 en 72 uur na toediening van de verse mest is de emissie van RD20 13 – 48% hoger, wat wel significant is (p<0,05). De cumulatieve CH₄ emissie van RD20 is 48 en 72 uur na toediening van de verse mest respectievelijk 40% en 43% hoger dan van RD15 en wijkt significant af (p<0,05). Voor de cumulatieve NH₃ emissies geldt dat deze 2, 6 en 12 uur na toediening van de verse mest 20 – 23% hoger is dan RD15 en dit significant is (p<0,05), maar na 24, 48 en 72 uur is dit verschil niet meer significant (p=0,06, p=0,07 en p=0,14 resp.).

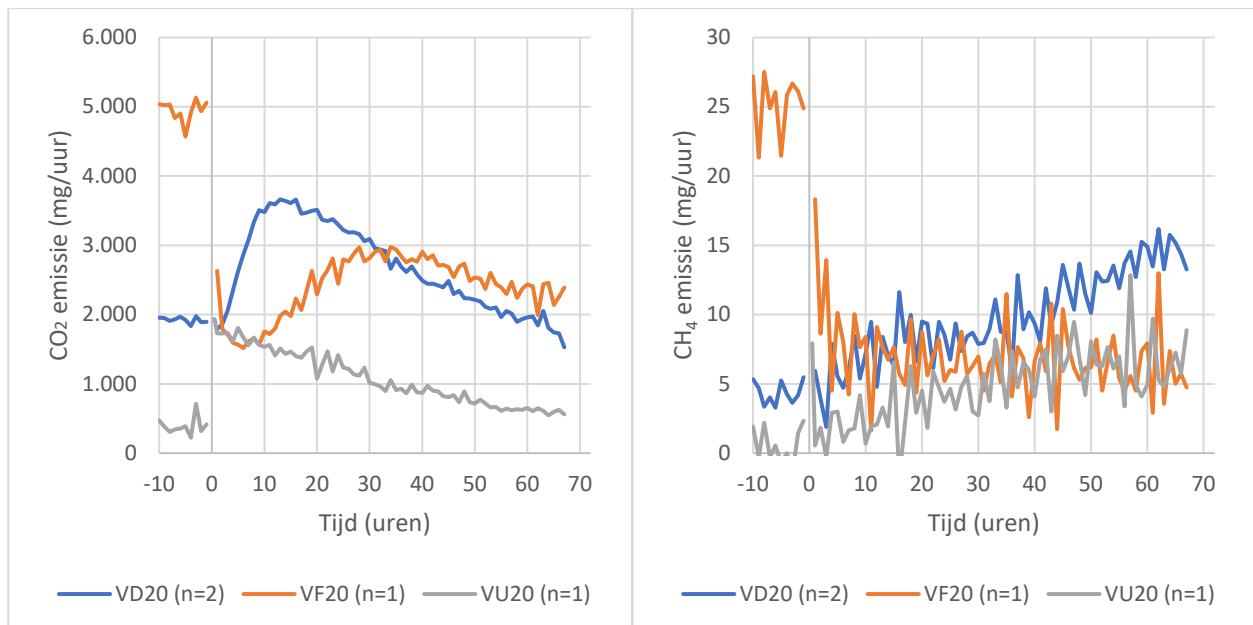
Kanttekening bij deze statistische toets is dat niet volledig aan de onafhankelijkheidsvoorwaarde is voldaan. Aangezien de toets is uitgevoerd op cumulatieve emissies, vindt er naarmate het aantal uur hoger wordt meer overlap plaats. Bij tijdstip 6 worden namelijk ook de eerste twee uren meegenomen die ook al zijn bepaald bij tijdstip 2 enzovoorts.

4.4.2 Varkens

Koolstofdioxide (CO₂)

De CO₂ emissies uit varkensdrijfmest stijgen sterk na het toedienen van de verse mest (t=0) en pieken na circa 15 uur op 3.600 mg/uur (Figuur 8, links). Na de piek neemt de emissie bijna lineair af tot het eind van de meetperiode (1.500 mg/uur). De CO₂ emissie uit varkensfeces nemen eerst af om vervolgens na circa 5 uur weer te stijgen. Na 30 – 40 uur na toediening van de verse feces wordt een piek bereikt (3.000 mg/uur), waarna de emissie geleidelijk weer afneemt. De CO₂ emissie uit urine neemt ongeveer lineair af gedurende de meetperiode en begint bij 1.900 mg/uur en eindigt op 560 mg/uur. De emissies uit varkensdrijfmest zijn in de eerste uren hoger dan uit varkensfeces en -urine. Na 33 uur is de CO₂ emissie uit feces hoger dan uit drijfmest en urine, maar nemen alle emissies af tot het eind van de meetperiode. De CO₂ emissies uit varkensurine zijn bijna de gehele meetperiode het laagst.

Voor het toedienen van de verse mest is de CO₂ emissie uit varkensdrijfmest vergelijkbaar met de emissie direct na het toedienen van de verse mest (t=0). De CO₂ emissie uit de oude varkensfeces is echter veel hoger dan na het toedienen van de verse feces. De CO₂ emissie uit de oude urine is daarentegen lager dan na het toedienen van de verse urine.

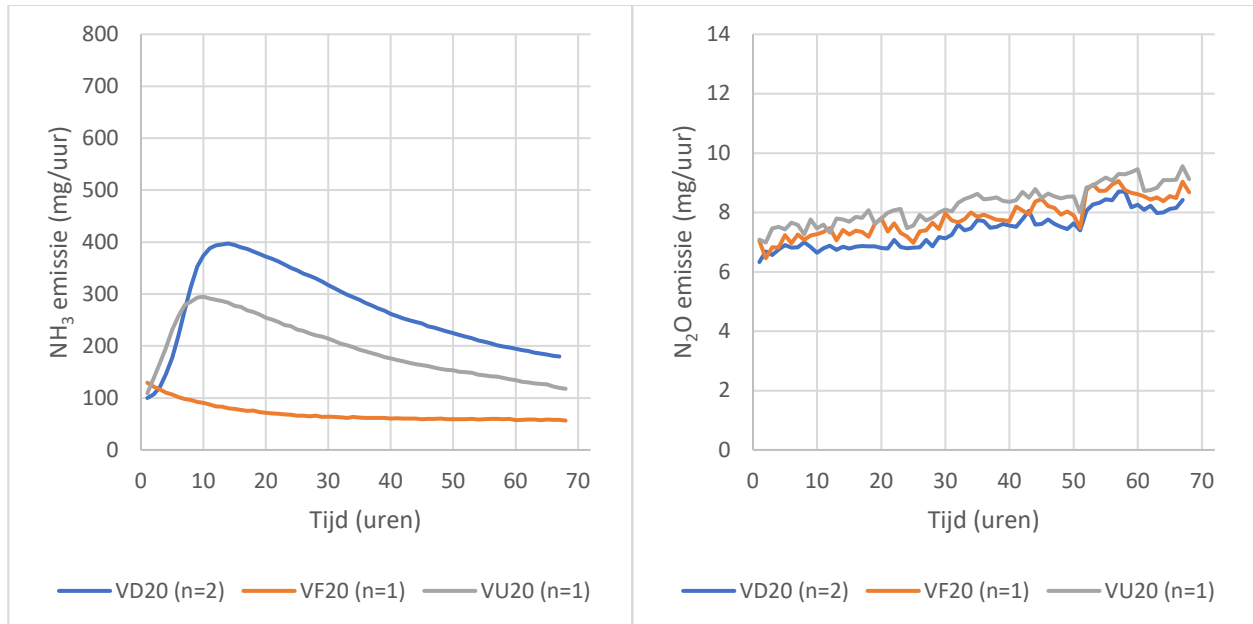


Figuur 8 Gemiddelde koolstofdioxide (CO₂) en methaan (CH₄) emissies uit varkensdrijfmest (VD20), varkensfeces (VF20) en varkensurine (VU20) van 20°C. Op tijdstip 0 is de oude mest/urine uit de mestput verwijderd en is verse mest/urine toegevoegd.

Methaan (CH₄)

Het emissiepatroon van CH₄ is grillig, maar ondanks het grillige verloop lijkt de CH₄ emissie uit varkensdrijfmest en -urine gedurende de meetperiode op te lopen van respectievelijk 5 mg/uur tot 15 mg/uur en van 1 mg/uur tot 6 mg/uur (Figuur 8, rechts). De CH₄ emissie uit varkensfeces neemt eerst sterk

af, om vervolgens te stabiliseren op 7 mg/uur. Gedurende de rest van de meetperiode lijkt deze emissie constant te blijven. De CH₄ emissie uit varkensfeces is in de eerste 10 uur het hoogst. De rest van de meetperiode is de CH₄ emissie uit varkenschrijfmest het hoogst. De CH₄ emissie uit varkensurine is de eerste 35 uur het laagst en loopt vanaf dan gelijk op met de emissies uit varkensfeces. Vergeleken met de CH₄ emissie uit oude mest voor het toedienen van de verse mest (t=0) is de emissie uit de verse varkenschrijfmest vergelijkbaar met de emissie direct na het toedienen van de verse mest. De CH₄ emissie uit de oude feces ligt hoger dan na toediening van de verse feces en de CH₄ emissie uit de oude urine lijkt juist iets lager te liggen.



Figuur 9 Gemiddelde ammoniak (NH₃) en lachgas (N₂O) emissies uit varkenschrijfmest (VD20), varkensfeces (VF20) en varkensurine (VU20) van 20°C. Op tijdstip 0 is de oude mest/urine uit de mestput verwijderd en is verse mest/urine toegevoegd.

Ammoniak (NH₃)

Na toediening van de verse mest (op t=0) nemen de NH₃ emissies uit varkenschrijfmest en varkensurine sterk toe (Figuur 9, links). De NH₃ emissie uit varkenschrijfmest piekt na circa 15 uur op 400 mg/uur, terwijl de NH₃ emissie uit varkensurine iets eerder piekt (circa 10 uur) op 300 mg/uur. Beide emissies nemen na de piek geleidelijk af om aan het eind van de meetperiode uit te komen op 180 en 120 mg/uur voor respectievelijk drijfmest en urine. De NH₃ emissie uit varkensfeces vertoont een ander verloop. De emissie neemt in de eerste 20 – 30 uur iets af, om te stabiliseren op circa 60 mg/uur. De NH₃ emissies uit varkenschrijfmest en -urine lopen in de eerste 8 uur ongeveer gelijk op. Daarna zwakt de emissie uit urine af, terwijl die uit drijfmest verder oploopt. De NH₃ emissie uit varkensfeces start iets hoger, maar is na enkele uren het laagst van de drie fracties en blijft de rest van de meetperiode het laagst.

Lachgas (N₂O)

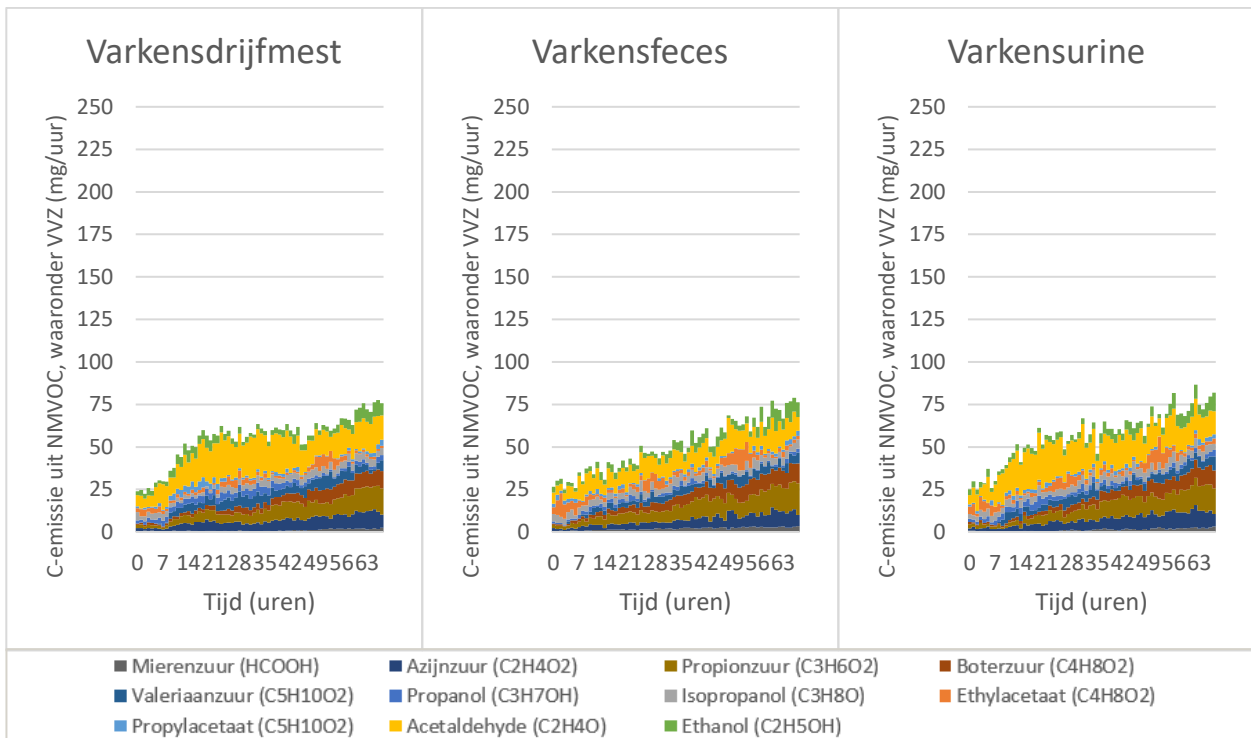
De N₂O emissies uit de varkensfracties laten allen een vergelijkbaar verloop zien (Figuur 9, rechts). Gedurende de meetperiode lopen de emissies iets op van gemiddeld 7 mg/uur direct na toediening van de verse mest tot 9 mg/uur aan het eind van de meetperiode.

De N₂O emissies uit varkenschrijfmest zijn het laagst en uit varkensurine het hoogst. De emissies uit varkensfeces liggen hier tussenin.

De meting van NH₃ en N₂O emissies voor toediening van de verse mest (t=-10 tot t=0) bevatte meetfouten, waardoor de emissies pas vlak voor het toedienen van de verse mest bepaald konden worden.

Niet-methaan vluchtige organische componenten (NMVOC), waaronder vluchtige vetzuren (VVZ)

De gemiddelde totale emissie van NMVOC (waaronder VVZ) neemt na het toedienen van alle drie de mestfracties toe (Figuur 10). De C-emissie uit NMVOC heeft een vergelijkbaar verloop voor de drie fracties, het neemt de eerste 15 uur toe van 25 mg/uur op t=0 tot circa 75 mg/uur aan het eind van de meetperiode.



Figuur 10 Indicatieve koolstof (C) emissie van niet-methaan vluchtige organische componenten (NMVOC), waaronder vluchtige vetzuren (VVZ), in milligram per uur uit varkensdrijfmest (links), varkensfeces (midden) en varkensurine (rechts).

De samenstelling en het aandeel van de verschillende NMVOC staat weergegeven in Tabel 12. Daaruit blijkt dat uit alle drie de fracties vooral acetaldehyde vervluchtigt, gevolgd door azijnzuur, propionzuur en ethanol. Uit varkensfeces vervluchtigt daarnaast ook mierenzuur. Er vindt bijna geen emissie plaats van ethylacetaat, propylacetaat en valeriaanzuur. De meeste C-emissie vindt plaats uit acetaldehyde, propionzuur en azijnzuur. Daarnaast vindt uit varkensfeces ook C-emissie plaats uit boterzuur.

Tabel 12 Gemiddelde samenstelling en koolstof (C)-emissie uit vluchtige vetzuren en niet-methaan vluchtige organische componenten uit varkensdrijfmest (VD20), -feces (VF20) en -urine (VU20) van 20°C over de gehele meetperiode (indicatief).

	Concentratie (ppm)			C-emissie (mg/uur)			C-emissie (%)		
	VD20	VF20	VU20	VD20	VF20	VU20	VD20	VF20	VU20
Propanol (C ₃ H ₇ OH)	0,13	0,06	0,10	3,0	1,4	2,4	5	3	4
Ethylacetaat (C ₄ H ₈ O ₂)	0,06	0,08	0,08	2,6	4,1	3,8	5	8	7
Isopropanol (C ₃ H ₈ O)	0,15	0,17	0,17	3,4	4,2	4,2	6	8	7
Acetaldehyde (C ₂ H ₄ O)	1,10	0,66	1,01	16,8	10,5	16,7	30	21	29
Propylacetaat (C ₅ H ₁₀ O ₂)	0,05	0,03	0,03	1,8	1,4	1,4	3	3	2
Ethanol (C ₂ H ₅ OH)	0,28	0,29	0,26	4,4	4,6	4,3	8	9	8
Azijnzuur (C ₂ H ₄ O ₂)	0,38	0,32	0,37	5,8	5,2	6,1	10	10	11
Boterzuur (C ₄ H ₈ O ₂)	0,15	0,18	0,15	4,6	5,8	5,0	8	11	9
Mierenzuur (HCOOH)	0,13	0,24	0,15	1,0	1,9	1,2	2	4	2
Propionzuur (C ₃ H ₆ O ₂)	0,32	0,35	0,32	7,3	8,4	7,9	13	16	14
Valeriaanzuur (C ₅ H ₁₀ O ₂)	0,12	0,09	0,09	4,6	3,5	3,8	8	7	7
Totaal	2,85	2,48	2,74	55,1	50,8	56,8	100	100	100

4.4.3 Kalveren

Koolstofdioxide (CO₂)

Na het toedienen van de verse mest/urine (t=0) neemt de CO₂ emissie uit alle drie de fracties eerst in enkele uren iets af, om vervolgens weer langzaam toe te nemen (Figuur 11, links). De CO₂ emissies uit kalverdrijfmest stijgen tot circa 25 uur (1.250 mg/uur) en nemen dan langzaam weer af tot 600 mg/uur aan

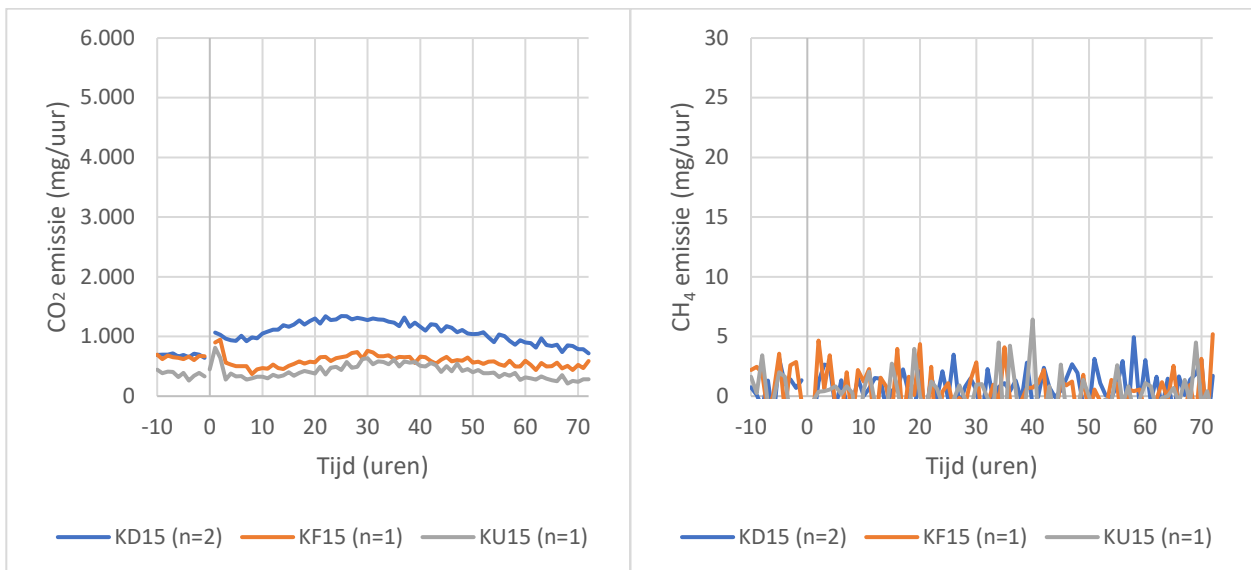
het eind van de meetperiode. Voor kalverfeces en -urine ontstaat deze lichte verhoging na circa 30 uur op respectievelijk 630 mg/uur en 530 mg/uur. De CO₂ emissie uit kalverdrijfmest is gedurende de gehele meetperiode hoger dan uit kalverfeces of -urine. Uit kalverurine emiteert de minste CO₂ en de CO₂ emissie uit kalverfeces ligt hier iets boven.

Vóór het toedienen van de verse drijfmest is de CO₂ emissie uit kalverdrijfmest iets lager, maar aan het eind van de meetperiode is de emissie uit de verse mest weer ongeveer op gelijk niveau. De CO₂ emissie uit de oude kalverfeces en -urine (voor t=0) is lager dan de emissie direct na toediening van de verse mest, maar na enkele uren is de emissie terug op het oude niveau.

Methaan (CH₄)

Het emissieverloop van CH₄ is grillig en de CH₄ emissie uit de kalverfracties zijn laag (Figuur 11, rechts). Hierdoor is het moeilijk te onderscheiden hoe de emissies van de verschillende fracties verlopen. De CH₄ emissie uit kalverurine lijkt constant gedurende de meetperiode.

De emissies uit de oude mest (voor t=0) lijken vergelijkbaar met de emissies na toediening van de verse mest.



Figuur 11 Gemiddelde koolstofdioxide (CO₂) en methaan (CH₄) emissies uit kalverdrijfmest (KD15), kalverfeces (KF15) en kalverurine (KU15) van 15°C. Op tijdstip 0 is de oude mest/urine uit de mestput verwijderd en is verse mest/urine toegevoegd.

Ammoniak (NH₃)

Na toediening van de verse mest (op t=0) neemt de NH₃ emissie uit kalverdrijfmest sterk toe (Figuur 12, links). Na circa 25 uur piekt de emissie op 240 mg/uur, om vervolgens langzaam af te nemen tot 135 mg/uur aan het eind van de meetperiode. De NH₃ emissie uit kalverfeces blijft in de eerste uren na toediening van de verse feces constant 50 mg/uur, om na 30 uur langzaam te dalen naar 35 mg/uur aan het eind van de meetperiode. Uit kalverurine is de NH₃ emissie de eerste uren ook constant (85 mg/uur) om vervolgens op te lopen tot circa 30 uur na toediening van de verse urine (165 mg/uur). Daarna neemt de emissie weer af tot 92 mg/uur aan het eind van de meet periode. De NH₃ emissies uit de kalverdrijfmest beginnen lager dan die uit kalverurine, maar na enkele uren is de NH₃ emissie uit kalverdrijfmest hoger en dit blijft de rest van de meetperiode zo. De NH₃ emissie uit kalverfeces is het laagst.

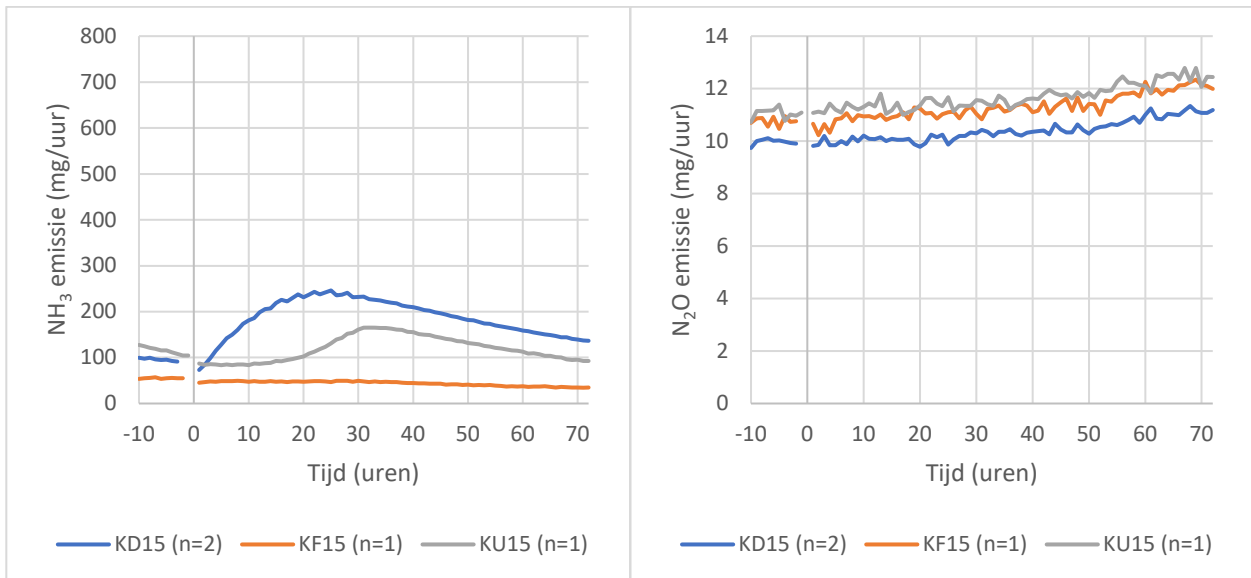
Voor het toedienen van de verse mest/urine (t=0) is de NH₃ emissie uit alle drie de fracties hoger dan vlak daarna. De NH₃ emissie uit kalverdrijfmest stijgt binnen enkele uren boven dit niveau uit, terwijl dit voor kalverurine wat langer duurt (circa 20 uur). De NH₃ emissie uit kalverfeces komen gedurende de meetperiode niet meer op het niveau van de oude feces.

Lachgas (N₂O)

De N₂O emissie na het toedienen van de verse mest/urine verloopt voor alle drie de fracties nagenoeg hetzelfde (Figuur 12, rechts). Gedurende de meetperiode nemen de N₂O emissies langzaam toe van 10 – 11 mg/uur direct na toediening tot 11 – 12 mg/uur aan het einde van de meetperiode.

De N₂O emissie is het hoogst uit kalverurine en de emissies uit kalverfeces liggen hier dichtbij. De N₂O emissie uit kalverdrijfmest is lager en blijft gedurende de hele meetperiode onder het emissieniveau van kalverfeces en -urine.

Voor het toedienen van de verse mest/urine (t=0) is de N₂O emissie uit alle drie de fracties vergelijkbaar met vlak daarna.



Figuur 12 Gemiddelde ammoniak (NH₃) en lachgas (N₂O) emissies uit kalverdrijfmest (KD15), kalverfeces (KF15) en kalverurine (KU15) van 15°C. Op tijdstip 0 is de oude mest/urine uit de mestput verwijderd en is verse mest/urine toegevoegd.

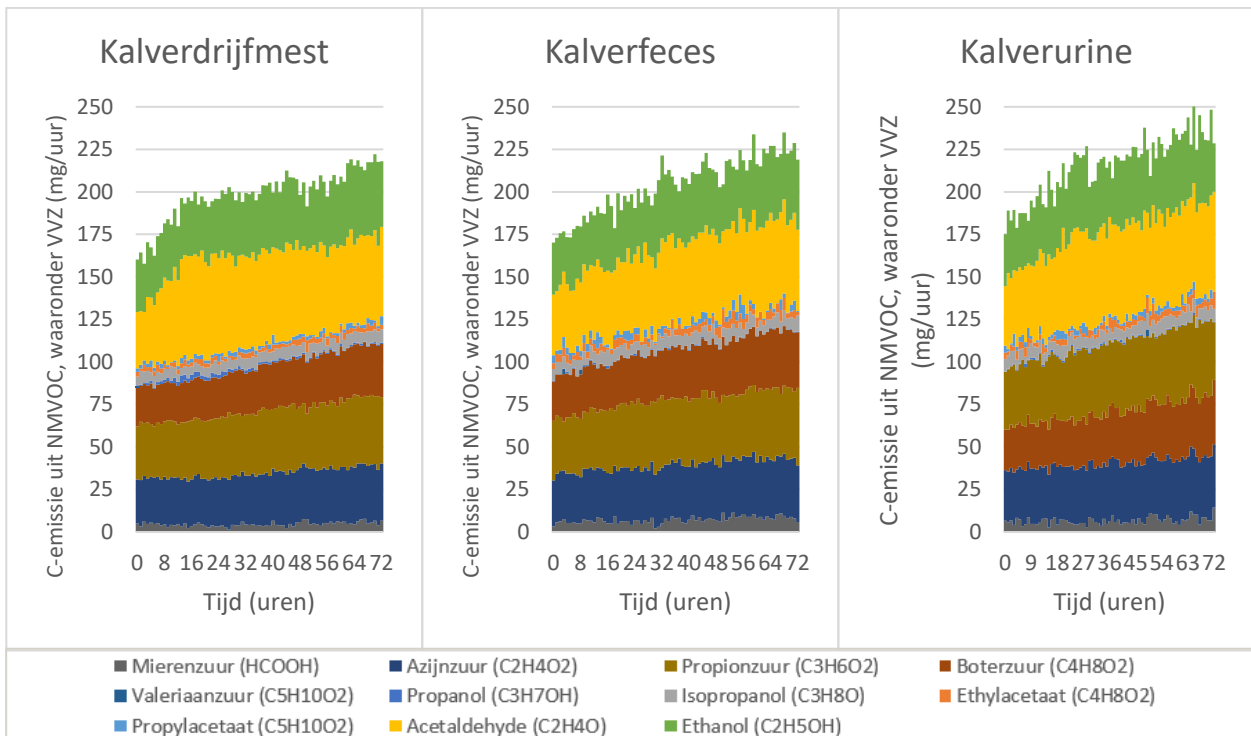
Niet-methaan vluchtige organische componenten (NMVOC), waaronder vluchtige vetzuren (VVZ)

De gemiddelde totale emissie van NMVOC (waaronder VVZ) neemt na het toedienen van alle drie de mestfracties toe (Figuur 13). De C-emissie uit NMVOC uit kalverdrijfmest neemt de eerste 15 uur wat sneller toe om vervolgens langzamer door te stijgen. Aan het eind van de meetperiode is de C-emissie uit kalverdrijfmest, -feces en -urine respectievelijk 220, 225 en 230 mg/uur.

De samenstelling en het aandeel van de verschillende NMVOC staat weergegeven in Tabel 13. Daaruit blijkt dat uit kalverfeces vooral veel acetaldehyde en ethanol vervluchtigt, gevolgd door azijnzuur en propionzuur. Er vindt bijna geen emissie plaats van propanol, ethylacetaat, propylacetaat en valeriaanzuur. De meeste C-emissie vindt plaats uit acetaldehyde, ethanol, azijnzuur, boterzuur en propionzuur.

Tabel 13 Gemiddelde samenstelling en koolstof (C)-emissie uit niet-methaan vluchtige organische componenten, waaronder vluchtige vetzuren, uit kalverdrijfmest (KD15), -feces (KF15) en -urine (KU15) van 15°C over de gehele meetperiode (indicatief).

	Concentratie (ppm)			C-emissie (mg/uur)			C-emissie (%)		
	KD15	KF15	KU15	KD15	KF15	KU15	KD15	KF15	KU15
Propanol (C ₃ H ₇ OH)	0,06	0,01	0,02	1,4	0,4	0,6	1	0	0
Ethylacetaat (C ₄ H ₈ O ₂)	0,06	0,08	0,08	2,8	4,2	3,9	1	2	2
Isopropanol (C ₃ H ₈ O)	0,27	0,28	0,28	6,3	7,0	7,2	3	3	3
Acetaldehyde (C ₂ H ₄ O)	3,33	2,77	2,98	51,6	46,2	51,4	26	23	24
Propylacetaat (C ₅ H ₁₀ O ₂)	0,06	0,08	0,07	2,2	3,2	3,0	1	2	1
Ethanol (C ₂ H ₅ OH)	2,36	2,15	2,25	36,6	35,9	38,7	18	18	18
Azijnzuur (C ₂ H ₄ O ₂)	1,94	1,93	1,97	30,1	32,2	33,9	15	16	16
Boterzuur (C ₄ H ₈ O ₂)	0,85	0,89	0,88	26,4	29,8	30,3	13	15	14
Mierenzuur (HCOOH)	0,60	0,86	0,78	4,6	7,2	6,7	2	4	3
Propionzuur (C ₃ H ₆ O ₂)	1,57	1,51	1,53	36,3	37,9	39,6	18	19	18
Valeriaanzuur (C ₅ H ₁₀ O ₂)	0,00	0,00	0,00	0,0	0,1	0,0	0	0	0
Totaal	11,11	10,59	10,83	198,4	204,1	215,4	100	100	100



Figuur 13 Indicatieve koolstof (C) emissie van niet-methaan vluchtige organische componenten (NMVOC), waaronder vluchtige vetzuren (VVZ), in milligram per uur uit kalverdrijfmest (links), kalverfeces (midden) en kalverurine (rechts).

4.4.4 Cumulatieve emissies

Koolstofdioxide (CO₂)

De gemiddelde cumulatieve CO₂ emissie uit de mestfracties van rundvee stijgen allemaal ongeveer lineair (Figuur 14, links). Alleen de emissie uit rundveedrijfmest van 15°C en rundveefeces lijken na respectievelijk 20 en 15 uur sneller te stijgen, terwijl de CO₂ emissie uit rundvee-urine juist richting het eind van de meetperiode lijkt af te buigen. Direct na het toedienen van de verse mest/urine, is de cumulatieve CO₂ emissie uit rundvee-urine het hoogst, maar na circa 25 uur wordt de cumulatieve CO₂ emissie uit rundveedrijfmest van 20°C hoger. De cumulatieve CO₂ emissie uit rundveefeces is het laagst.

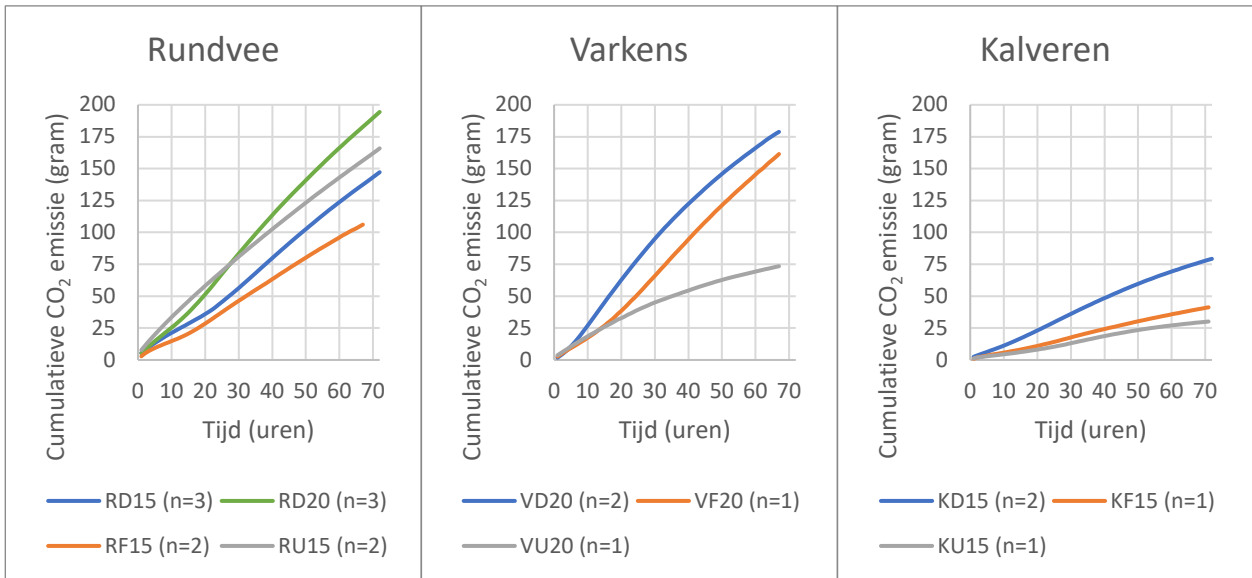
De gemiddelde cumulatieve CO₂ emissie uit varkensdrijfmest en -urine buigt gedurende de meetperiode af (Figuur 14, midden). De CO₂ emissie uit varkensfeces lijkt juist na circa 15 uur sterker toe te nemen. Uit varkensdrijfmest komt cumulatief de meeste CO₂ emissie, gevolgd door varkensfeces. Uit varkensurine emitteert de minste CO₂.

De gemiddelde cumulatieve CO₂ emissie van alle drie de mestfracties van kalveren buigen gedurende de meetperiode af (Figuur 14, rechts). Uit kalverdrijfmest komt cumulatief de meeste CO₂ emissie. Uit kalverurine komt de minste CO₂ emissie en de emissie van kalverfeces ligt hier net iets boven.

Van de drijfmestfracties heeft rundveedrijfmest van 20°C de hoogste cumulatieve CO₂ emissie (192 gram na 72 uur), gevolgd door varkensdrijfmest (177 gram na 68 uur) en rundveedrijfmest van 15°C (147 gram na 72 uur) en de laagste CO₂ emissie komt uit kalverdrijfmest (80 gram na 72 uur). Van de fecesfracties komt de meeste CO₂ emissie uit varkensfeces (161 gram na 68 uur), gevolgd door rundveefeces (106 gram na 72 uur) en kalverfeces (41 gram na 72 uur). Van de urinefracties komt de meeste CO₂ emissie uit rundvee-urine (166 gram na 72 uur), gevolgd door varkensurine (73 gram na 68 uur) en kalverurine (30 gram na 72 uur).

Methaan (CH₄)

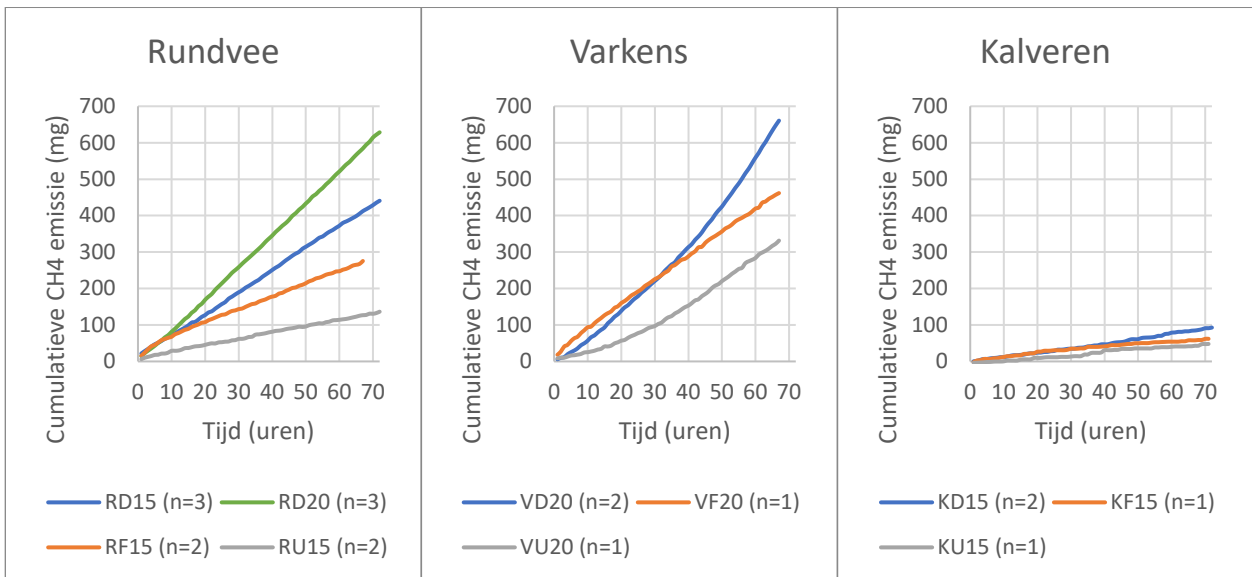
De gemiddelde cumulatieve CH₄ emissie uit de mestfracties van rundvee stijgen allemaal ongeveer lineair (Figuur 15, links). Direct na het toedienen van de verse mest/urine, is de cumulatieve CH₄ emissie uit rundveedrijfmest van 15°C en 20°C en rundveefeces de eerste circa 8 uur ongeveer gelijk. De cumulatieve CH₄ emissie uit rundvee-urine is direct al lager vergeleken met de andere rundvee-mestsoorten. De cumulatieve CH₄ emissie uit rundveedrijfmest van 20°C is het hoogst, gevolgd door rundveedrijfmest van 15°C en rundveefeces.



Figuur 14 Gemiddelde cumulatieve koolstofdioxide (CO₂) emissie in gram uit rundvee (R), varkens (V) en kalver (K) mestfracties, onderverdeeld in drijfmest (D), feces (F) en urine (U).

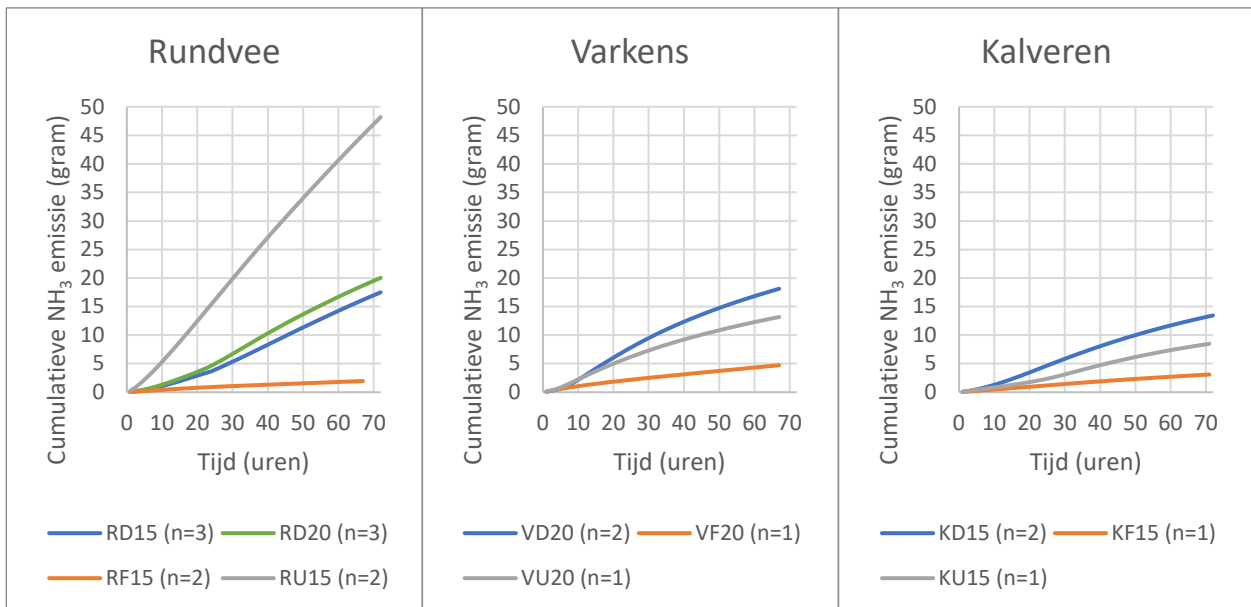
De gemiddelde cumulatieve CH₄ emissie uit varkensdrijfmest en -urine neemt exponentieel toe gedurende de meetperiode, terwijl de cumulatieve CH₄ emissie uit varkensfeces lineair lijkt toe te nemen (Figuur 15, midden). De cumulatieve CH₄ emissie uit varkensurine is het laagst. Direct na het toedienen van de verse mest is de cumulatieve CH₄ emissie uit varkensfeces de eerste 33 uur het hoogst, waarna de emissie uit varkensdrijfmest dit inhaalt.

De gemiddelde cumulatieve CH₄ emissie uit kalverdrijfmest lijkt lineair toe te nemen gedurende de meetperiode (Figuur 15, rechts). De cumulatieve CH₄ emissie uit kalverdrijfmest komt als hoogste uit, die van kalverurine als laagste.



Figuur 15 Gemiddelde cumulatieve methaan (CH₄) emissie in gram uit rundvee (R), varkens (V) en kalver (K) mestfracties, onderverdeeld in drijfmest (D), feces (F) en urine (U).

Van de drijfmestfracties heeft varkensdrijfmest de hoogste cumulatieve CH₄ emissie (660 milligram na 68 uur), gevolgd door rundveedrijfmest van 20°C (630 milligram na 72 uur) en rundveedrijfmest van 15°C (440 milligram na 72 uur) en de laagste CH₄ emissie komt uit kalverdrijfmest (93 milligram na 72 uur). Van de fecesfracties komt de meeste CH₄ emissie uit varkensfeces (462 milligram na 68 uur), gevolgd door rundveefeces (275 milligram na 68 uur) en kalverfeces (41 gram na 72 uur). Van de urinefracties komt de meeste CH₄ emissie uit varkensurine (320 milligram na 68 uur), gevolgd door rundvee-urine (136 gram na 72 uren kalverurine (58 milligram na 72 uur).



Figuur 16 Cumulatieve ammoniak (NH₃) emissie in gram uit rundvee (R), varkens (V) en kalver (K) mestfracties, onderverdeeld in drijfmest (D), feces (F) en urine (U).

Ammoniak (NH₃)

De gemiddelde cumulatieve NH₃ emissie uit rundveefeces en -urine vertonen een lineair verloop (Figuur 16, links), waarbij een sterke stijging is te zien voor urine en een vlakker verloop voor feces. De cumulatieve emissie uit rundveedrijfmest van 15°C en 20°C neemt na circa 25 uur toe. De cumulatieve NH₃ emissie uit rundvee-urine is verre weg het hoogst en die uit rundvee-feces het laagst. De cumulatieve emissie van rundveedrijfmest (15°C en 20°C) ligt daar tussenin.

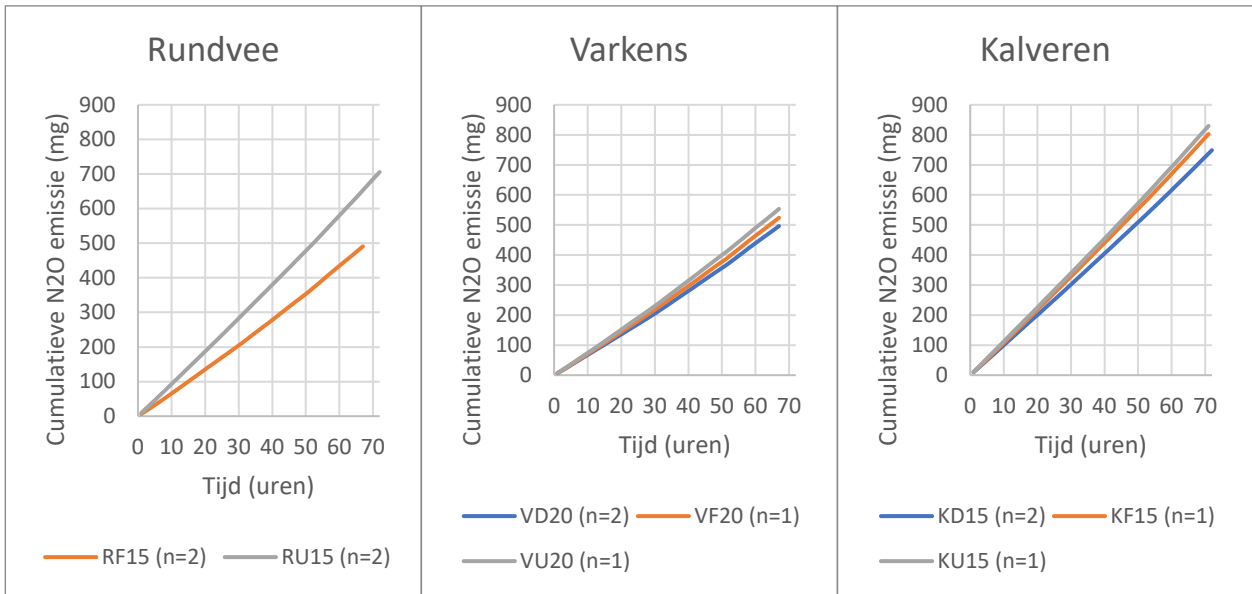
De gemiddelde cumulatieve NH₃ emissie van de mestfracties van varkens en kalveren laten eenzelfde trend zien (Figuur 16, midden en rechts). Voor beide diercategorieën buigt de cumulatieve NH₃ emissie van drijfmest en urine af gedurende de meetperiode, terwijl de cumulatieve emissies uit feces redelijk lineair zijn. De emissies uit de varkensfracties zijn iets hoger dan van de kalverfracties.

Van de drijfmestfracties heeft rundveedrijfmest van 20°C de hoogste cumulatieve NH₃ emissie (20 gram na 72 uur), gevolgd door varkensdrijfmest (18 gram na 68 uur) en rundveedrijfmest van 15°C (17 gram na 72 uur) en de laagste NH₃ emissie komt uit kalverdrijfmest (13 gram na 72 uur). Uit de fecesfracties van de drie diercategorieën kwam een vergelijkbare NH₃ emissie (2 tot 5 gram na 68 – 72 uur). Uit de urinefracties komt verreweg de meeste NH₃ emissie uit rundvee-urine (48 gram na 72 uur), gevolgd door varkensurine (13 gram na 68 uur) en kalverurine (8 gram na 72 uur).

Lachgas (N₂O)

De gemiddelde cumulatieve N₂O emissie uit de mestfracties van alle drie de diercategorieën stijgen ongeveer lineair (Figuur 17). Voor alle diercategorieën geldt dat de urinefracties de hoogste cumulatieve N₂O emissie heeft, gevolgd door de fecesfractie en de drijfmestfractie (voor varkens en kalveren). Bij rundveefeces en -urine is vanaf enkele uren een duidelijk verschil tussen beide fracties zichtbaar. Bij de varkens- en kalverfracties zijn de cumulatieve N₂O emissies de eerste 5 – 10 uur vergelijkbaar.

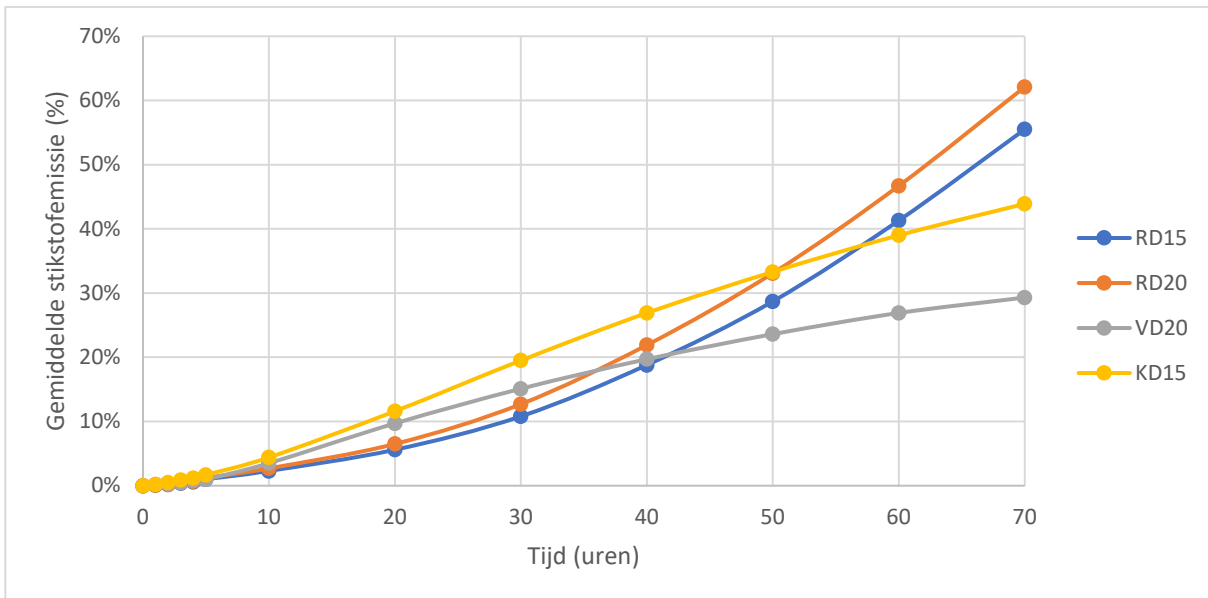
De kalverdrijfmest heeft een hogere cumulatieve N₂O emissie (737 milligram na 72 uur) dan de varkensdrijfmest (480 milligram na 68 uur). Van de fecesfracties komt de meeste N₂O emissie uit kalverfeces (766 milligram na 72 uur), gevolgd door varkensfeces (530 milligram na 68 uur) en rundveefeces (480 milligram na 68 uur). Van de urinefracties komt de meeste CH₄ emissie uit kalverurine (830 milligram na 72 uur), gevolgd door rundvee-urine (705 milligram na 72 uur) en varkensurine (544 milligram na 68 uur).



Figuur 17 Cumulatieve lachgas (N₂O) emissie in milligram uit rundvee (R), varkens (V) en kalver (K) mestfracties, onderverdeeld in drijfmest (D), feces (F) en urine (U).

Stikstof emissie

In Figuur 18 is op basis van de gemeten ammoniakemissie weergegeven hoeveel procent van het (totale) stikstof in de uitgangsmest is vervluchtigd vanaf de uitscheiding onder de staart tot 70 uur na uitscheiding. Hieruit blijkt dat de eerste 5 – 10 uur na uitscheiding weinig ammoniak emitteert, maar dat daarna de emissie sneller oploopt. Bij de rundveedrijfmest is het temperatuureffect wederom zichtbaar, omdat bij 20°C meer stikstof emitteert dan bij 15°C. Wat ook opvalt is dat de trend in rundveedrijfmest exponentieel lijkt te zijn, terwijl dit bij varkens- en kalverdrijfmest uiteindelijk af lijkt te nemen. Varkensdrijfmest (gevolgd door kalverdrijfmest) heeft daarom na 70 uur het laagste percentage geëmitteerd stikstof vergeleken met de andere mestsoorten.



Figuur 18 Gemiddelde stikstofemissie (% van N bij t=0) wanneer mest na 1 tot 70 uren uit de stal/put wordt verwijderd vergeleken met wanneer het direct onder de staart zou worden opgevangen (t=0). RD15 = rundveedrijfmest (15°C), RD20 = rundveedrijfmest (20°C), VD = varkensdrijfmest (20°C) en KD = kalverdrijfmest (15°C).

4.5 Massabalansen

Tabel 14 geeft de massabalans voor stikstof (N) weer. Aangezien de N₂O emissie voor rundveedrijfmest niet is gemeten, ontbreken deze waarden in de N-massabalans. Dit kan verklaren dat er bij rundveedrijfmest een verschil ontstaat, maar naar verwachting kan (maar een klein deel van) dit verschil verklaard worden door de N₂O emissie. Daarnaast treden ook stikstofemissies op in de vorm van NO en N₂, maar deze emissies zijn in dit onderzoek niet gemeten. Verder laat de stikstof massabalans zien dat de meeste stikstof verloren gaat in de vorm van NH₃ emissie en dat het stikstofverlies door N₂O emissie veel kleiner is. Bij varkensdrijfmest, varkensurine, kalverdrijfmest en kalverurine is het onverklaarbare verschil kleiner dan 9%. Alle drie de fecesfracties laten een groter verschil zien, wat kan worden verklaard door de wijze van monstername, omdat monsters van feces minder homogeen zijn.

Tabel 14 Stikstof massabalans (in gram) over de meetperiode van circa 70 uur. N-in en N-uit zijn bepaald aan de hand van mestanalyses van de ingaande en overgebleven mest, N-NH₃ emissie en N-N₂O emissie is gemeten door de FTIR en omgerekend naar stikstof (N) en N-condens is bepaald aan de hand van analyses van het opgevangen condenswater uit het ventilatiesysteem. Het verschil is bepaald door het verschil tussen N-in en N-uit te vergelijken met de verliezen (N-NH₃ en N-N₂O emissie en N-condens). De rechter kolom geeft het verschil ten opzichte van de ingaande hoeveelheid stikstof (N-in) in percentage weer. Nb = niet bepaald.

Mest	Week	Cel	N-in	N-NH ₃ emissie	N-N ₂ O emissie	N-condens	N-uit	Vershil	% t.o.v. N-in
RD15	1	1A	64	15	nb	1,0	48	-0,6	-1%
	1	1B	60	14	nb	0,9	50	-5,0	-8%
	1	3A	66	15	nb	0,9	54	-3,0	-5%
RD20	1	3B	67	14	nb	0,0	56	-2,9	-4%
	1	4A	72	18	nb	0,0	51	2,9	4%
	1	4B	63	18	nb	0,1	47	-1,9	-3%
RF15	2	4A	39	2	0,2	0,0	58	-21,3	-55%
	2	4B	38	2	0,2	0,0	64	-27,3	-71%
RU15	3	4A	153	38	0,2	0,2	121	-6,3	-4%
	3	4B	202	42	0,2	0,1	131	28,4	14%
VD20	2	1A	58	14	0,2	0,2	43	0,9	2%
	2	1B	65	15	0,2	0,2	49	0,3	0%
VF20	2	3B	49	4	0,2	0,1	53	-8,6	-18%
VU20	2	3A	18	10	0,2	0,0	7	0,6	4%
KD15	3	1A	33	14	0,3	0,1	19	-0,1	0%
	3	1B	28	9	0,3	0,1	19	-0,3	-1%
KF15	3	3B	12	3	0,3	0,0	13	-3,7	-29%
KU15	3	3A	9	7	0,3	0,0	3	-0,8	-9%

De massabalans voor koolstof (C) is weergegeven in Tabel 15. Aangezien de C-emissie uit NMVOC (waaronder VVZ) voor rundveedrijfmest niet is gemeten, ontbreken deze waarden in de C-massabalans. Hierdoor kan waarschijnlijk een deel van het verschil bij rundveedrijfmest verklaard worden. Daarnaast laat de C-massabalans zien dat de meeste koolstof in de eerste 70 uur na uitscheiding van de mest voornamelijk verloren gaat in de vorm van CO₂ en dat het koolstofverlies in de vorm van CH₄ veel kleiner is. De hoeveelheid koolstofemissie uit NMVOC is hoger dan het koolstofverlies via CH₄, maar lager dan het koolstofverlies via CO₂. In tegenstelling tot de N-balans, laten de fecesfracties in de C-balans over het algemeen de laagste percentuele verschillen zien. Het onverklaarbare verschil bij de urine fracties van varkens- en kalverurine is juist hoog (-52% en -113%). Dit kan mogelijk verklaard worden door het lage gehalte organische stof in urine, waardoor een klein absoluut verschil snel resulteert in een groot procentueel verschil.

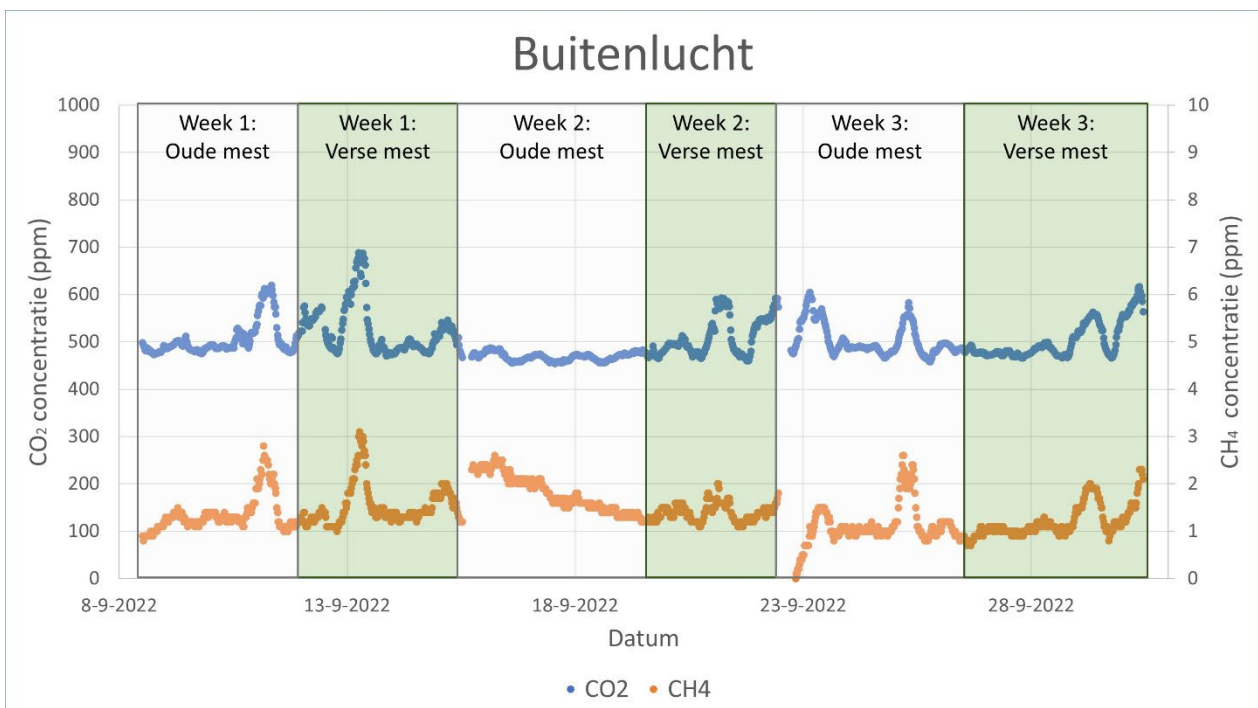
Tabel 15 Koolstof massabalans (in gram) over de meetperiode van circa 70 uur. C-in en C-uit zijn bepaald aan de hand van mestanalyses van de ingaande en overgebleven mest en C-CO₂ emissie, C-CH₄ emissie en C emissie uit vluchtige vetzuren en niet-methaan vluchtige organische componenten (C-vluchtig) gemeten door de FTIR en omgerekend naar koolstof (C). Het verschil is bepaald door het verschil tussen C-in en C-uit te vergelijken met de verliezen (C-CO₂, C-CH₄, C-vluchtig). De rechter kolom geeft het verschil ten opzichte van de ingaande hoeveelheid stikstof (C-in) in percentage weer. Nb = niet bepaald.

Mest	Week	Cel	C-in	C-CO ₂ emissie	C-CH ₄ emissie	C-vluchtig	C-uit	Vershil	% t.o.v. C-in
RD15	1	1A	820	41	0,385	nb	600	179	22%
	1	1B	789	39	0,309	nb	661	88	11%
	1	3A	861	40	0,276	nb	672	150	17%
RD20	1	3B	801	49	0,411	nb	676	75	9%
	1	4A	822	56	0,533	nb	668	98	12%
	1	4B	830	56	0,483	nb	615	159	19%
RF15	2	4A	877	29	0,088	3,1	837	7	1%
	2	4B	955	29	0,069	3,1	856	66	7%
RU15	3	4A	613	54	0,042	14,3	542	3	1%
	3	4B	543	56	0,048	16,7	596	-127	-23%
VD20	2	1A	634	47	0,173	3,7	525	58	9%
	2	1B	614	51	0,189	3,8	544	15	2%
VF20	2	3B	865	45	0,130	3,4	875	-59	-7%
VU20	2	3A	26	20	0,088	3,9	16	-13	-52%
KD15	3	1A	265	28	0,026	14,7	257	-35	-13%
	3	1B	318	23	0,022	14,3	264	17	5%
KF15	3	3B	237	14	0,003	14,9	255	-48	-20%
KU15	3	3A	18	10	0,000	15,7	14	-21	-113%

5 Discussie

5.1 Meetapparatuur

In dit onderzoek zijn gasconcentraties met twee verschillende meetapparaten gemeten. De meetapparatuur van de KRC hebben CO₂ en CH₄ gemeten en de FTIR heeft CO₂, CH₄, NH₃, N₂O en NMVOC (waaronder VVZ) gemeten. Om te bepalen of beide meetapparaten gelijke resultaten geven, zijn de CO₂ emissies vergeleken. Hierbij moet rekening gehouden worden dat de KRC zowel de gasconcentraties van de buitenlucht als de gasconcentraties in de cel hebben gemeten en de concentraties van de buitenlucht zijn afgetrokken van de gemeten concentraties in de cel. De FTIR heeft geen gasconcentraties in de buitenlucht gemeten, maar alleen in de cellen. Voor NH₃ en N₂O metingen is dit geen probleem, aangezien de gemiddelde NH₃ en N₂O concentraties in de buitenlucht laag zijn (CLO, 2021, 2023). Echter, buitenlucht bevat wel een bepaalde hoeveelheid CO₂ en CH₄, wat het lastig maakt om de metingen tussen de KRC en de FTIR te vergelijken.



Figuur 19 CO₂ (blauw) en CH₄ (oranje) concentratie in ppm in de buitenlucht rondom de klimaatrespiratiecellen. De groene velden geven aan wanneer gemeten is aan de verse mest en de grijze velden geven te tussenliggende perioden aan waarin de oude mest in KRC zat.

Figuur 19 geeft de gemeten CO₂ en CH₄ concentratie in de buitenlucht aan (gemeten door KRC) en dit laat zien dat er gedurende de meetperiodes enkele variaties waren. Dit kan veroorzaakt worden door activiteiten in de buurt van de KRC, zoals het vervoeren van mest of de aanwezigheid van dieren in de nabije omgeving. Deze activiteiten kunnen echter ook een (tijdelijke) verhoging van de NH₃ concentratie in de buitenlucht veroorzaken. Aangezien dit niet is gemeten in dit onderzoek, kunnen de NH₃ emissies zoals gemeten in dit onderzoek in de werkelijkheid lager uitvallen.

5.2 Broeikasgasemissies

De CO₂ emissies uit de verse mestfracties waren over het algemeen hoger dan uit de oude mest, maar namen vervolgens binnen de meetperiode wel weer af tot het niveau van de oude mest. Dit kan komen

doordat bij de toediening van de verse mest de mest in beweging gebracht werd. Hierdoor kan CO₂ in het begin van de meetperiode makkelijk ontsnappen. Na een aantal uren stabiliseert de mest in de mestputjes, waardoor deze CO₂ emissie weer afneemt. Zowel bij alle mestfracties van rundvee en kalveren als bij varkensfeces werd direct na toediening van de verse mest deze piek in CO₂ emissie waargenomen. CO₂ uit organische mest telt overigens niet mee als broeikasgas, omdat het deel uitmaakt van de korte koolstofkringloop.

De CH₄ emissies vertoonden bij alle mestfracties een grillig verloop, wat komt doordat CH₄ in belletjes in de mest aanwezig is. Deze belletjes verplaatsen zich naar het mestoppervlak en breken daar open. Daardoor komt de in de mest geproduceerde CH₄ niet direct vrij, maar belletje voor belletje.

Op basis van het literatuuronderzoek in Hoofdstuk 2 werd verwacht dat de methaanemissie uit verse drijfmest in de eerste dagen na uitscheiding lager zou zijn vergeleken met de oude drijfmest, omdat de methaanemissie pas na enkele weken piekt (Misselbrook et al., 2016; Wood et al., 2012). Dit patroon wordt door dit onderzoek bevestigd. De methaanemissie uit verse rundvee- en kalverdrijfmest was lager dan uit de oude drijfmest en de piek liet zich niet zien in de eerste 70 uur na uitscheiding. De methaanemissie uit oude varkensdrijfmest daarentegen was gelijk aan de methaanemissie uit de verse mest en de emissie uit verse mest nam ongeveer lineair toe in de tijd. Ook voor deze mestfractie werd nog geen piek waargenomen in de eerste 70 uur naar uitscheiding.

Bij (aan de bron) gescheiden urine werd verwacht dat hier weinig methaan uit gevormd zou worden, omdat er weinig organische stof in deze fractie zit. De resultaten van het huidige onderzoek laten ook zien dat er weinig methaan wordt gevormd uit urine en dat de methaanvorming uit oude en verse urine ongeveer gelijk is. Daarnaast werd bij (aan de bron) gescheiden feces verwacht dat de methaanemissie lager zou zijn vergeleken met de emissie uit drijfmest, omdat in drijfmest meer anaerobe condities heersen, hetgeen uiteraard wel afhankelijk is van het droge stofgehalte van de feces. Ook dit patroon is in het huidige onderzoek zichtbaar, aangezien de methaanemissie uit de fecesfracties van de verschillende diercategorieën lager was dan de methaanemissie uit de drijfmestfracties. Wel was de methaanemissie uit verse rundveefeces hoger vergeleken met de methaanemissie uit de oude feces fractie, terwijl dit voor varkens duidelijk lager was.

Daarnaast was de methaanemissie uit kalvermest (en soms ook varkensmest) erg laag. Vanwege de lage mestvolumes was, met name bij de fecesfracties, niet altijd de gehele bodem van de mestput bedekt met mest, waardoor er mogelijk geen zuurstofloze omgeving kon ontstaan. Daarnaast kan het zijn dat er niet voldoende bacteriën aanwezig waren en kan het even duren voordat een bacteriekolonie is opgezet. Mogelijk kunnen de lage methaanemissies uit kalvermest ook te maken hebben met de voersamenstelling, namelijk weinig structuur en organische stof, omdat zij veel melkproducten gevoerd krijgen.

Van Bruggen et al. (2023) stelt dat uit melkvee-, varkens- en kalverdrijfmest respectievelijk 37,8, 6,2 en 8,9 kg CH₄/dierplaats/jaar emitteert. In Tabel 16 is weergegeven wat deze emissiefactoren omgerekend per uur, per dag en per drie dagen zijn. Vergeleken met de in het huidige onderzoek gemeten CH₄-emissie blijkt wederom dat in de eerste uren na uitscheiding de CH₄-emissie erg laag is, namelijk voor alle mestfracties minder dan 1,3% vergeleken met de gemiddelde emissie per uur op basis van de emissiefactor.

Tabel 16 Emissiefactoren (Van Bruggen et al., 2023) voor methaan (CH₄) omgerekend naar emissie per dag en per uur, vergeleken met de gemeten CH₄-emissie in het huidige onderzoek.

		RD15		RD20		VD20		KD15	
Emissiefactor	Kg CH ₄ /dierplaats/jaar ¹	37,8 ¹		37,8 ¹		6,2 ²		4,1 ³	
	Gram CH ₄ /dierplaats/dag	104	100%	104	100%	17	100%	11,2	100%
	Gram CH ₄ /dierplaats/uur	4,3	100%	4,3	100%	0,71	100%	0,5	100%
Emissie (gemeten)	Gram CH ₄ na één uur	0,01	0,2%	0,01	0,2%	0,01	1,1%	0,00	0%
	Gram CH ₄ na één dag (24 uur)	0,14	0,1%	0,20	0,2%	0,17	1,0%	0,01	0,1%
	Gram CH ₄ na drie dagen (68 uur)	0,41	0,1%	0,59	0,2%	0,66	1,3%	0,05	0,1%

¹Melk- en kalfkoeien: 37,8, ²Vleesvarkens: 6,2 (zeugen: 18,5), ³Witvleeskalveren 4,1 (rosé vleeskalveren: 8,9)

5.3 Stikstofemissies

Op basis van het literatuuronderzoek in Hoofdstuk 2 werd verwacht dat de ammoniakemissie uit verse drijfmest hoger zou zijn dan uit oude drijfmest, maar dat er uit de fecesfracties in de eerste uren na uitscheiding minder ammoniak emitteert vergeleken met drijfmest. De verwachting was dat uit feces weinig ammoniak zou emitteren, omdat (afhankelijk van het scheidingsrendement van het systeem) maar een beperkte hoeveelheid ureum (en ammonium) in de feces fractie aanwezig zal zijn en alleen deze minimale hoeveelheid kan worden omgezet naar ammonium. Aangezien in de praktijk niet alle urine volledig zuiver opgevangen kan worden, zal er altijd enige menging van feces en urine plaatsvinden waardoor ammoniak zal emitteren. Uit de urinefractie zal meer ammoniakemissie plaatsvinden, omdat in deze fractie veel ureum aanwezig is en door de aanwezigheid van urease uit het kleine beetje feces dit (deels) zal worden omgezet in ammonium.

Het verloop van de ammoniakemissie van de verschillende drijfmest en urine fracties komt overeen met het typische verloop zoals gerapporteerd door Elzing et al. (1992), waarbij de ammoniakemissie binnen enkele uren piekt, om vervolgens langzamer weer af te nemen. Echter, vindt de piek in het huidige onderzoek pas plaats na circa 10 – 30 uur na toediening, terwijl Elzing et al. (1992) de piek binnen 1 – 2 uur na toediening rapporteert. Dit kan mogelijk komen door het feit dat in het huidige onderzoek de mestputjes na elke ronde werden schoon gemaakt met water, waardoor telkens een nieuw evenwicht gevonden moet worden (Elzing et al., 1992). In het onderzoek is dit geprobeerd te ondervangen, door eerst enkele dagen oude mest in de putjes te zetten, om zo een bevuild oppervlak na te bootsen. Verder is in het huidige onderzoek handmatig verse drijfmest gemaakt, door de opgevangen feces en urine met elkaar te mengen. In praktijkstallen komen de urine en feces direct na uitscheiding al bij elkaar. De handmatig gemengde drijfmest kan daardoor mogelijk schoner zijn dan drijfmest die via een (bevulde) vloer in een mestkelder of opslag terecht komt. De handelswijze in de proef kan een verklaring zijn voor het feit dat de piek in ammoniakemissie later optrad dan verwacht.

Met name in rundvee- en varkensurine was het gehalte N-ammonium bij de start van de meetperiode hoog, wat aangeeft dat veel ureum al is omgezet in ammoniak. In dat geval zou je geen sterke stijging van de ammoniakemissie meer verwachten tijdens de meetperiode. Toch is er een emissiepiek waargenomen. Een verklaring hiervoor kan zijn dat er enige tijd heeft gezeten tussen het nemen van het monster van de urine en de daadwerkelijke analyses van het monster, waardoor een deel van de ureum kan zijn omgezet.

Tabel 17 Emissiefactoren (Rav) voor ammoniak (NH₃) omgerekend naar emissie per dag en per uur, vergeleken met de gemeten NH₃-emissie in het huidige onderzoek.

		RD15		RD20		VD20		KD15	
Emissiefactor	Kg NH ₃ /dierplaats/jaar	13		13		3,0		3,5	
	Gram NH ₃ /dierplaats/dag	35,6	100%	35,6	100%	8,2	100%	9,6	100%
	Gram NH ₃ /dierplaats/uur	1,5	100%	1,5	100%	0,3	100%	0,4	100%
Kelderoppervlak (uit Tabel 2)	m ² /dierplaats	5,5		5,5		0,4		1,6	
Emissie (gemeten)	Gram NH ₃ /1,3 m ² na één uur	0,05		0,06		0,1		0,07	
	Gram NH ₃ /1,3 m ² na één dag (24 uur)	4,90		6,1		7,3		4,5	
	Gram NH ₃ /1,3 m ³ na drie dagen (68 uur)	16,4		19,0		17,9		13,0	
	Gram NH ₃ /dierplaats na één uur	0,21	4%	0,25	17%	0,03	9%	0,09	22%
	Gram NH ₃ /dierplaats na één dag (24 uur)	3,77	11%	3,77	11%	3,77	46%	3,77	39%
	Gram NH ₃ /dierplaats na drie dagen (68 uur)	12,7	12%	14,6	14%	13,8	56%	10,0	35%

Uit Bijlage V van de Omgevingsregeling (voorheen Regeling ammoniak en veehouderij) blijkt dat uit melkvee-, varkens- en kalverdrijfmest respectievelijk 13, 3 en 3,5 kg NH₃/dierplaats/jaar emitteert. In Tabel 17 is weergegeven wat deze emissiefactoren omgerekend per uur, per dag en per drie dagen zijn. Vergeleken met de in het huidige onderzoek gemeten NH₃ emissies (omgerekend per dierplaats) blijkt voornamelijk voor rundvee- en varkensdrijfmest dat de NH₃ emissie in de eerste uren na uitscheiding laag is.

Voor melkveedrijfmest is de emissie 4 – 17% lager vergeleken met de gemiddelde emissie per uur op basis van de emissiefactor, 11% op basis van één dag (eerste 24 uur) en 12% op basis van drie dagen (eerste 68 uur). Voor varkensdrijfmest is dit 9% op basis van het eerste uur, 46% op basis van de eerste dag en 56% op basis van de eerste drie dagen. Voor kalverdrijfmest ligt dit het eerste uur iets hoger, namelijk 22% op basis van het eerste uur, maar 39% op basis van de eerste dag en 35% op basis van de eerste drie dagen.

Lachgas kan vrij komen bij een onvolledig proces van nitrificatie en denitrificatie, waarbij denitrificatie zorgt voor de grootste bijdrage aan lachgasvorming. Nitrificatie is de oxidatie van NH_4^+ in NO_3^- , waarbij afhankelijk van de omstandigheden (o.a. pH en temperatuur) stikstofmonoxide (NO) en lachgas (N_2O) gevormd kunnen worden. Denitrificatie is de microbiologische omzetting van nitraat (NO_3^-) naar stikstofgas (N_2) onder zuurstofloze omstandigheden. Tussenproducten zijn nitriet (NO_2^-), stikstofmonoxide (NO) en lachgas (N_2O). Urine en feces zijn na uitscheiding zuurstofloos, waardoor ze geen geoxideerde stikstofverbindingen bevatten. Hierdoor is denitrificatie in stallen en mestopslagen afhankelijk van de levering van geoxideerde stikstofverbindingen uit het nitrificatieproces (Oenema et al., 2000).

Tabel 18 Berekende totale N_2O emissie (gram) uit de stal op basis van de emissiefactoren gerapporteerd door Van Bruggen et al. (2023) en het stikstofgehalte in de mest (Tabel 7) en de cumulatieve N_2O emissie na 24, 48 en 72 uur (gram) uit het huidige onderzoek.

Mestfractie	Berekende N_2O emissie (gram)	Gemeten N_2O emissie (gram)		
		Na 24 uur	Na 48 uur	Na 72 uur ¹
RD15	13 – 32	N.B.	N.B.	N.B.
RD20	13 – 34	N.B.	N.B.	N.B.
RF15	8 – 21	0,2	0,3	0,5
RU15	12 – 29	0,2	0,4	0,7
VD20	12 – 30	0,2	0,3	0,5
VF20	3 – 8	0,2	0,4	0,5
VU20	11 – 28	0,2	0,4	0,6
KD15	6 – 15	0,2	0,5	0,7
KF15	1 – 2	0,3	0,5	0,8
KU15	5 – 13	0,3	0,5	0,8

¹Bij RF15, VD20, VF20 en VU20 is geen 72 maar 68 uur gemeten. De weergegeven emissie voor deze fracties is cumulatief tot 68 uur.

Het verloop in de N_2O emissie in het huidige onderzoek is voor alle mestfracties vergelijkbaar. De emissie is redelijk constant, maar lijkt in het verloop van de tijd langzaam toe te nemen. Het vergelijken van absolute N_2O emissies met emissies gerapporteerd in de literatuur is lastig, omdat het rantsoen van de dieren en de omgeving waarin de mest zich bevindt grote invloed heeft op de N_2O emissie (Broucek, 2017). Van Bruggen et al. (2023) rapporteert voor rundvee en varkens emissiefactoren van 0,2 en 0,5% van de N-excretie voor dunne en vaste mest respectievelijk. In Tabel 18 is berekend wat de totale N_2O emissie uit de stal aan de hand van deze emissiefactoren zou zijn en is weergegeven wat de cumulatieve N_2O emissie na 24, 48 en 72 uur na uitscheiding in het huidige onderzoek was. De N_2O emissie uit de verse mest was na 24 uur 1 – 5%, na 48 uur 1 – 12% en na 72 uur 2 – 17% van de totale N_2O emissie. Door mest of mestfracties snel uit de stal te verwijderen kan de N_2O emissie dus fors worden verminderd.

5.4 Emissies NMVOC (waaronder VVZ)

In dit onderzoek zijn niet-methaan vluchtige organische componenten (NMVOC), waaronder vluchtige vetzuren (VVZ), gemeten met behulp van een FTIR. Dit is de eerste keer dat een dergelijke meting is uitgevoerd en onder andere vanwege de versheid van de mest was het niet mogelijk de resultaten te vergelijken met ander onderzoek. De instellingen van de FTIR zijn gekozen op basis van referentiespectra uit een generieke bibliotheek en geoptimaliseerd op basis van de meetresultaten. Wellicht kunnen (onjuiste) instellingen een groot effect hebben gehad op de resultaten. Daarnaast bevat lucht rondom mest een scala aan stoffen, wat het meten van specifieke geurcomponenten complex maakt. Andere componenten dan de mestcomponenten kunnen interfereren, waardoor ruis ontstaat.

De VVZ die zijn gemeten in dit onderzoek zijn mierenzuur, azijnzuur, boterzuur, propionzuur en valeriaanzuur. Daarnaast zijn de NMVOC's propanol, ethylacetaat, isopropanol, acetaldehyde, propylacetaat en ethanol gemeten. De resultaten van het huidige onderzoek geven voor alle mestsoorten ongeveer dezelfde samenstelling qua concentraties. Acetaldehyde emitteert het meest. Voor melkvee en varkens wordt dit gevolgd door azijnzuur en ethanol, maar bij kalveren is dit net andersom. Alleen uit varkensmest emitteert valeriaanzuur en propanol emitteert niet uit kalvermest. Uit Amon et al. (2020) blijkt dat emissies uit varkensstallen uit meerdere vluchtige componenten bestaan, voornamelijk isopropanol, butanon, acetaldehyde, azijnzuur en propionzuur. Uit rundveestallen emitteert voornamelijk propanol en ethylacetaat, gevolgd door isopropanol en acetaldehyde in mindere mate. De gerapporteerde emissie van acetaldehyde in Amon et al. (2020) en het huidige onderzoek komt ongeveer overeen. Het hoge aandeel van propanol en ethylacetaat uit melkveestallen (Amon et al., 2020) kan ook komen door de aanwezigheid van kuilvoer in de stal, wat voor emissies van deze vluchtige componenten kan zorgen (Hafner et al., 2013). Dit zijn dus geen specifieke emissies uit mest. Wat wel opvalt is dat Amon et al. (2020) lage ethanol emissies rapporteert (0,1% voor rundvee en <0,0% voor varkens), terwijl in het huidige onderzoek wel ethanol is gemeten (voornamelijk uit varkens en kalvermest). Daarbij past de opmerking dat het analysepakket van de FTIR ingegeven is vanuit rundveemest en daarom bijvoorbeeld butanol niet gemeten werd.

Blanes-Vidal et al. (2009a;2009b) hebben twee onderzoeken gedaan naar (oude) varkensdrijfmest in "flux chambers". Hierbij zijn de concentraties van verschillende vluchtige organische componenten in de aanwezige lucht in de flux chambers gemeten door middel van thermal desorption Gas Chromatography Mass Spectrometry. De concentratie azijnzuur lag in het onderzoek tussen 75,7 en 151,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en de concentratie propionzuur lag tussen 50,0 en 87,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. In het huidige onderzoek zijn concentraties van gemiddeld 0,38 ppm azijnzuur (1,02 mg/m^3) en 0,32 ppm propionzuur (1,06 mg/m^3) gemeten uit varkensmest. Dit ligt dus ongeveer een factor 10 tot 15 hoger vergeleken met Blanes-Vidal et al. (2009a;2009b). Dit verschil kan verklaard worden doordat oude mest over het algemeen minder vluchtige vetzuren bevat dan verse mest. De Buisonjé & Verheijen (2014) laten zien dat de afbraak van vluchtige vetzuren piekt na circa 32 dagen en er na 129 dagen nagenoeg geen vluchtige vetzuren meer in de mest aanwezig zijn. Daarnaast kan de verscheidenheid aan componenten in lucht rondom mest ervoor zorgen dat niet alle componenten accuraat kunnen worden gemeten. Andere componenten kunnen interfereren, waardoor de gemeten waarden van de mestcomponenten mogelijk hoger uitvallen.

5.5 BMP en hydrolyse constanten

Van alle verse mestfracties in dit onderzoek is het biochemisch methaan potentieel (BMP) bepaald. Deze varieerde, afhankelijk van de mestfractie tussen 229 tot 524 $\text{Nm}^3/\text{ton OS}$. Groenestein et al. (2016) heeft aan de hand van verschillende emissiemetingen uit de literatuur het gemiddelde BMP van rundveedrijfmest en vaste mest en varkensdrijfmest en vaste mest bepaald. In Tabel 19 zijn deze BMP waarden naast de BMP waarden uit het huidige onderzoek weergegeven. Hieruit blijkt dat alle vier de mestfracties een hoger BMP hebben wanneer de mest vers is, vergeleken met de mest van gemiddelde ouderdom uit Groenestein et al. (2015). Ook recent onderzoek naar het BMP van varkens- en melkveedrijfmest laat zien dat het BMP van deze mest lager is dan de verse fracties uit het huidige onderzoek. Hilgert et al. (2023) vindt bij rundveemest van circa 5 dagen oud een BMP van 0,225 – 0,315 $\text{m}^3/\text{kg OS}$ en bij varkensmest een BMP 0,260 – 0,410 $\text{m}^3/\text{kg OS}$. Ander onderzoek waarbij redelijk verse mest (maximaal 8 uur oud) van vleeskoeien is gebruikt rapporteerde een BMP van 0,203 – 0,360 $\text{m}^3/\text{kg OS}$ (Gopalan et al., 2013). Dit bevestigt dat het vergisten van verse mest leidt tot een hogere gasproductie vergeleken met het vergisten van oudere mest.

Tabel 19 BMP (in $\text{Nm}^3/\text{kg OS}$) uit rundveedrijfmest en -feces en varkensdrijfmest en -feces uit het huidige onderzoek en zoals bepaald in Groenestein et al. (2015).

	Huidige onderzoek	Groenestein et al. (2015)
Rundveedrijfmest	0,387	0,22
Rundveefeces (vaste mest)	0,432	0,22
Varkensdrijfmest	0,449	0,31
Varkensfeces (vaste mest)	0,450	0,31

Aan de hand van de BMP waarden zijn voor de mestfracties de hydrolyse constanten bepaald (paragraaf 4.3). Hieruit bleek dat bij rundveemest drijfmest de hoogste hydrolyse constante heeft, gevolgd door feces. Bij varkens en kalveren had de fecesfractie de hoogste hydrolyse constante, gevolgd door drijfmest. Bij alle diercategorieën had de urinefractie de laagste hydrolyse constante. Dit in tegenstelling tot de bevindingen van Timmerman et al. (2009), waar de dikke fractie na mechanische scheiding de laagste hydrolyse constante had. Timmerman et al. (2009) verklaarden dat de dikke fractie een groter aandeel moeilijk afbreekbare materialen bevat en dat grotere deeltjes een langere verblijftijd nodig hebben om afgebroken te worden. Hierdoor is de hydrolyse constante van dikke mestfracties met een groot aandeel moeilijk afbreekbaar materiaal doorgaans lager dan dunnere mestfracties met voornamelijk kleinere deeltjes.

Wel bestaat er een verschil in samenstelling tussen de dunne fractie na mechanische scheiding en een gier fractie zoals opgevangen in een systeem met scheiding aan de bron. Bij mechanische scheiding wordt de mest vaak op basis van deeltjesgrootte gescheiden. Hierdoor komen de grote deeltjes in de dikke fractie terecht en de kleine deeltjes in de dunne fractie. De gierfractie uit systemen met scheiding aan de bron heeft een andere samenstelling en kan ook grotere deeltjes bevatten. De verhouding tussen organische stof (OS) ten opzichte van droge stof (DS) ligt bij dunne fracties van mechanische scheiding hoger dan bij gierfracties bij scheiding aan de bron (Van Boxtmeer et al., 2023b; Timmerman et al., 2009).

Een andere mogelijke verklaring voor deze verschillen is het feit dat tijdens de BMP bepaling in het huidige onderzoek alleen CH₄ productie is gemeten en geen productie van VVZ. Het aandeel vluchtige vetzuren wat in de mest aanwezig is verschilt sterk per mestsoort en mede daardoor varieert ook de maximale methaanproductie per mestsoort (Timmerman et al., 2009). De resultaten van het huidige onderzoek hebben laten zien dat de emissies van VVZ voornamelijk uit de urinefracties hoog was. Dit kan erop wijzen dat deze VVZ tijdens de BMP analyse nog niet zijn omgezet in methaan.

In emissiemodellen worden hydrolyse constanten gebruikt om de afbraak van organische stof en de vorming van methaan in mest te berekenen (Gollenbeek et al., 2021a; 2021b; 2022). Onderzoek naar emissies bij verwaarding van varkensmest (Gollenbeek et al., 2021a) gebruikt de gemiddelde hydrolyse constante van Timmerman et al. (2009), namelijk 0,156, om de methaanproductie tijdens vergisting te bepalen. Echter zijn in Timmerman et al. (2009) meerdere soorten varkensmest onderzocht, van drijfmest van vleesvarkens, biggen en zeugen tot gehygiëniseerde mest en dunne en dikke mestfracties na mechanische scheiding. Timmerman et al. (2009) vond voor vleesvarkensmest, biggenmest, kraamzeugenmest en guste/dragende zeugenmest een hydrolyse constante van respectievelijk 0,09, 0,26, 0,20 en 0,12. Deze constanten liggen ver uit elkaar, wat aangeeft dat het type varkensmest invloed heeft op de methaanproductie uit de mest tijdens vergisting. Het is daarom lastig om één waarde te nemen voor varkensmest in het algemeen. In het huidige onderzoek is mest van vleesvarkens, gemengd met circa 25% mest van kraamzeugen gebruikt. Uit analyses van deze mest is een hydrolyse constante van 0,13 bepaald. Dit is iets lager dan de hydrolyse constante die is gebruikt in Gollenbeek et al. (2021a) en ligt tussen de hydrolyse constante van vleesvarkens en kraamzeugen van Timmerman et al. (2009) in. Er wordt in Gollenbeek et al. (2021a) geen onderscheid gemaakt in de hydrolyse constante voor vleesvarkens- of zeugenmest. Hierdoor kan de methaanproductie uit specifiek vleesvarkensmest worden overschat, terwijl dit voor zeugenmest wellicht wordt onderschat. Gollenbeek et al. (2021b) hebben een vergelijkbare studie naar vleeskalvermest gedaan. Bij gebrek aan informatie over biogasproductie specifiek voor de vergisting van kalvermest zijn de hydrolyse constanten afgeleid aan de hand van biogasproducties uit batch- en vergistingsproeven en vergelijking 5 (paragraaf 3.5.4). Voor drijfmest van blankvleeskalveren is een hydrolyse constante van 0,15 bepaald en voor rosékalveren 0,08. In het huidige onderzoek is mest van blankvleeskalveren gebruikt en is een hydrolyse constante van 0,07 voor drijfmest bepaald. Dit is lager dan de hydrolyse constante die is gebruikt in het onderzoek van Gollenbeek et al. (2021b).

Gollenbeek et al. (2022) hebben ook een vergelijkbare studie naar rundveemest gedaan. Vanwege het ontbreken van specifieke informatie van hydrolyse constanten die van toepassing zijn op het vergisten van rundveemest, is de gemiddelde hydrolyse constante van Timmerman et al. (2009) voor vergisting van varkensmest gebruikt. In het huidige onderzoek is voor rundveedrijfmest een hydrolyse constante van 0,15 bepaald, wat overeenkomt met de aanname van Gollenbeek et al. (2022).

6 Conclusie

Naar aanleiding van de ontwikkeling van snelle mestverwijdering uit stallen is in dit onderzoek bepaald wat het effect van snelle mestverwijdering is op de koolstof- en stikstofemissies in de eerste uren tot dagen na excretie. Dit onderzoek laat zien dat de NH₃ emissie uit drijfmest direct na toediening van de verse mest toenamen. Uit varkensdrijfmest vond de piek in NH₃ emissie na circa 10 uur plaats. De toename uit kalveren rundveedrijfmest was minder sterk en de piek vond na respectievelijk 20 en 40 uur plaats. Op basis van literatuur werd verwacht dat de piek in NH₃ emissie eerder plaats zou vinden. Naast dat vele factoren een rol spelen in de vorming en vervluchtiging van ammoniak, kan de handelswijze in de proef een verklaring zijn voor het feit dat de piek in ammoniakemissie later optrad dan verwacht.

Over het algemeen geldt dat de CH₄ en N₂O emissies uit de mestfracties laag waren. De N₂O emissies namen wel toe gedurende de meetperiode, terwijl het emissieverloop van CH₄ voor rundvee- en kalverfracties stabiel was. Alleen de CH₄ emissie uit varkensdrijfmest en -urine nam gedurende de eerste 3 dagen toe, maar de cumulatieve CH₄ emissie uit varkensdrijfmest na 3 dagen was enkel 1,3% van de CH₄ emissie volgens de emissiefactor (0,66 t.o.v. 6,2 kg CH₄/dierplaats/jaar). De BMP analyses lieten zien dat vooral drijfmest- en fecesfracties een hoge potentiële biogasproductie hebben. Doordat er in de eerste dagen na uitscheiding weinig CH₄ emitteert, kan een groter deel van het potentieel worden benut tijdens het vergistingsproces, wanneer de mest binnen enkele dagen uit de stal naar de vergister wordt afgevoerd. De CO₂ emissie uit drijfmest van rundvee en kalveren nam in de eerste uren af om vervolgens circa 10 uur na toediening weer toe te nemen. Het emissiepatroon uit varkensdrijfmest liet meteen een sterke stijging zien die piekt na 10 uur na toediening van de verse mest.

Daarnaast heeft dit onderzoek aangetoond dat de temperatuur van de mest invloed heeft op de emissies uit de mest. De cumulatieve CO₂ emissies uit rundveedrijfmest van 20°C waren na zes uur na toediening significant hoger vergeleken met 15°C. Voor cumulatieve CH₄ emissies geldt dat dit na circa 2 dagen significant hoger was bij 20°C. Het verschil in cumulatieve NH₃ emissies was na 2 uur al significant hoger bij 20°C, maar dit verschil trok later bij. 72 uur na toediening was het verschil tussen de cumulatieve NH₃ emissie uit rundveedrijfmest van 20°C niet meer significant hoger dan de emissies bij 15°C.

Verder zijn in dit onderzoek verkennende metingen gedaan naar de emissie van niet-methaan vluchtige organische componenten (NMVOC), waaronder vluchtige vetzuren (VVZ), uit de mestfracties. Uit de mestfracties van kalveren emitteerde de meeste koolstofemissie uit NMVOC, gevolgd door rundvee-urine. Uit de mestfracties van varkens en de rundveedrijfmest en -feces emitteerde ongeveer een factor 3 minder koolstof uit NMVOC. De samenstelling NMVOC (waaronder VVZ) verschilt per mestsoort en diercategorie. Gemiddeld kan de C-emissie uit NMVOC oplopen tot 10 – 23% uit rundveemest, 7 – 16% uit varkensmest en 16 – 62% uit kalvermest ten opzichte van de totale C-emissie uit de mest. Ook de koolstofemissie uit NMVOC nam na het toedienen van de verse mest toe, waardoor deze emissie kan worden voorkomen door de mest tijdig uit de stal te verwijderen.

Aan de hand van de resultaten van dit onderzoek kan worden geconcludeerd dat met name NH₃ emissie en emissie van koolstof in de vorm van CO₂ en NMVOC (waaronder VVZ) kunnen worden vermeden als mest binnen 8 – 10 uur na uitscheiding uit de stal wordt verwijderd. De CH₄ emissie komt in de eerste uren tot dagen na uitscheiding nog niet op gang, waardoor er weinig verschil is in CH₄ emissie na één uur vergeleken met één dag na toediening van verse mest. Ondanks dat in dit onderzoek de emissiepiek van N₂O (en mogelijk NMVOC) niet is waargenomen en deze waarschijnlijk pas later plaatsvindt, worden deze emissies bij de verwijdering van mest binnen 8 – 10 uur na uitscheiding ook verminderd. Wel moet de verwijderde mest vervolgens direct worden verwerkt (bijvoorbeeld vergist), zodat de vermeden emissies niet alsnog buiten de stal plaatsvinden.

In emissiemodellen worden hydrolyse constanten gebruikt om de afbraak van organische stof en de vorming van methaan in mest te berekenen. Er zijn echter geen hydrolyse constanten beschikbaar van alle mestsoorten en met name de afbraak van organische stof in de eerste uren na uitscheiding van de mest zijn

niet bekend. Het huidige onderzoek geeft meer inzicht in de hydrolyse constanten van verschillende verse mestfracties van melkvee, varkens en kalveren. Hiermee kunnen emissiemodellen worden geüpdatet en kunnen ook berekeningen gedaan worden waarbij andere mestfracties worden vergist, bijvoorbeeld de dikke fractie na scheiding aan de bron.

Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Naar aanleiding van de bevindingen en conclusies uit dit onderzoek wordt praktijkonderzoek in stallen aanbevolen, waarbij de verschillende emissies worden gemeten in de praktijksituatie. Het snel verwijderen van mest uit de stal kan een belangrijke maatregel zijn om emissies van ammoniak, methaan en geur te verminderen. Het is daarom nuttig om dit ook in de praktijk te meten. Vanwege het grote aantal factoren wat invloed heeft op de verschillende emissies, kunnen er ook grote verschillen in emissies tussen praktijkbedrijven ontstaan. Door op verschillende bedrijven te meten kan deze variatie in kaart worden gebracht. Daarnaast wordt aanbevolen om naast emissies uit de stallen, ook de emissies uit de mestopslagen te bemeten.

Om de resultaten van de verkennende metingen van de emissies van NMVOC (waaronder VVZ) uit mest te bevestigen wordt aanbevolen om hier gericht onderzoek naar te doen. De huidige resultaten geven een beeld van de emissie van deze componenten, maar waren te beperkt om hier conclusies aan te verbinden. Naast dat NMVOC een rol spelen bij de uitstoot van geur, zijn met name de vluchtige vetzuren ook betrokken in het proces van methaanvorming. Daarom zou het goed zijn dat in een vervolgonderzoek een meer gevalideerde meting van NMVOC (waaronder VVZ) gedaan wordt, om meer inzicht te krijgen in de vorming en emissie van deze componenten.

De resultaten van dit onderzoek laten zien dat er in de eerste uren na uitstoot weinig methaan emitterende uit de mest. Wanneer deze mest (buiten de stal) wordt opgeslagen, zal de methaan alsnog emitteren. Een van de maatregelen om deze methaanemissie te verminderen is om de verse mest direct te vergisten. Hiermee kan de uitstoot van methaan worden omgezet in een bijdrage aan groen gasproductie en daarmee bijdragen aan het vervangen van fossiele brandstoffen. In dit onderzoek is aangetoond dat de methaanuitstoot kan worden beperkt door mest vroegtijdig uit de stal te halen. Een vervolgonderzoek zou metingen kunnen doen aan het daadwerkelijke effect van het vergisten van deze zéér verse mest op de biogasproductie in een mono-mestvergister en de reductie van methaan uit digestaat. Deze effecten zijn tot op heden enkel modelmatig bepaald.

Tenslotte wordt aanbevolen om vervolgonderzoek in te zetten op de vraag hoe de verschillende mestfracties het beste kunnen worden toegepast. Stalsystemen waarbij feces en urine aan de bron worden gescheiden zijn momenteel veel in de aandacht als maatregel om ammoniakemissie uit stallen te beperken. Degelijke fracties verschillen sterk in chemische en fysische samenstelling. Dit onderzoek toont aan dat de emissiepatronen voor ammoniak en methaan voor urine/dunne fracties duidelijk anders zijn dan voor feces/dikke fracties. Daarnaast hebben feces/dikke fracties duidelijk een groter biogaspotentieel. De vraag rijst hoe deze producten weer in de kringloop kunnen worden gebracht en of hiervoor nog een verdere bewerking nodig is.

Literatuur

- Aarnink, A.J.A., A. Keen, J.H.M. Metz, L. Speelman, M.W.A. Verstegen (1995). Ammonia Emission Patterns during the Growing Periods of Pigs Housed on Partially Slatted Floors. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 62 (2). <https://doi.org/10.1006/jaer.1995.1069>
- Aarnink, A.J.A., J. de Groot, N.W.M. Ogink (2019). Brongerichte maatregelen voor beperking emissies uit bestaande varkensstallen. Wageningen Livestock Research, rapport 1205
- Amon, B., N. Hutchings, U. Dämmgen, S. Sommer, J. Webb (2020). 3.B Manure management 2019. EMEP/EEA air pollutant emission inventory Guidebook 2019. European Environment Agency
- Amon, B., V. Kryvoruchko, T. Amon, S. Zechmeister-Boltenstern (2006). Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 112(2-3). <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.030>
- Béline, F., J. Martinez, C. Marol, G. Guiraud (1998). Nitrogen transformations during anaerobically stored 15N-labelled pig slurry. *Bioresource Technology*. 64. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)84352-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)84352-0)
- Bell, R.G. (1970). Fatty Acid Content as a Measure of the Odour Potential of Stored Liquid Poultry Manure. *Poultry Science*. 49 (4). <https://doi.org/10.3382/ps.0491126>
- Blanes-Vidal, V., M.N. Hansen, A.P.S. Adamsen, A. Feilberg, S.O. Petersen, B.B. Jensen (2009b). Characterization of odor released during handling of swine slurry: Part II. Effect of production type, storage and physicochemical characteristics of the slurry. *Atmospheric Environment* 43(18). Pp 3006-3014. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.046>
- Blanes-Vidal, V., M.N. Hansen, A.P.S. Adamsen, A. Feilberg, S.O. Petersen, B.B. Jensen (2009a). Characterization of odor released during handling of swine slurry: Part I. Relationship between odorants and perceived odor concentrations. *Atmospheric Environment* 43(18). Pp 2997-3005.
- Broucek, J. (2017). Nitrous oxide production from cattle and swine manure. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology* 5(1). Pp 13 – 19. <http://dx.doi.org/10.14269/2318-1265/jabb.v5n1p13-19>
- Bruggen, C. van, A. Bannink, A. Bleeker, D.W. Bussink, H.J.C. van Dooren, C.M. Groenestein, J.F.M. Huijsmans, J. Kros, L.A. Lagerwerf, K. Oltmer, M.B.H. Ros, M.W. van Schijndel, L. Schulte-Uebbing, G.L. Velthof en T.C. van der Zee (2023). Emissies naar lucht uit de landbouw berekend met NEMA voor 1990-2021. Wageningen, WOT Natuur & Milieu, WOT-technical report 242
- CBS (2021a). Welke sectoren stoten broeikasgassen uit?. Centraal bureau voor de Statistiek. <https://www.cbs.nl/nl-nl/dossier/dossier-broeikasgassen/>. Geraadpleegd op 26-04-2023
- CBS (2021b). Stikstofemissies naar lucht. Centraal bureau voor de Statistiek. <https://www.cbs.nl/nl-nl/dossier/dossier-stikstof/>. Geraadpleegd op 26-04-2023
- CLO (2021). Concentratie broeikasgassen, 1950 – 2018 (indicator 0216, versie 14, 4 februari 2021). <https://www.clo.nl/indicatoren/>. Geraadpleegd op 06-02-2024
- CLO (2023). Ammoniak in de lucht, 2005-2021 (indicator 0461, versie 13, 13 februari 2023). <https://www.clo.nl/indicatoren/>. Geraadpleegd op 06-02-2024
- Cooper, P., I. Cornforth (1978). Volatile fatty acids in stored animal slurry. *Journal of the science of food and agriculture*, 29 (1). <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740290104>
- Dalby, F.R., S.D. Hafner, S.O. Petersen, A.C. VanderZaag, J. Habtewold, K. Dunfield, M.H. Chantigny, S.G. Sommer (2020). Understanding methane emission from stored animal manure: A review to guide model development. *Journal of Environmental Quality*. 50. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20252>
- De Buissonjé, F.E., R. Verheijen (2014). Drijfmest verliest snel zijn waarde voor biogas. *V-focus* 2014, 11(2), pp 20-21
- Doublein, D., A. Steinhauser (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*, ISBN 9783527621705. John Wiley & Sons, Germany
- Dijkstra, J., O. Oenema, J.W. van Groenigen, J.W. Spek, A.M. van Vuuren, A. Bannink (2013). Diet effects on urine composition of cattle and N₂O emissions. *Animal*. 7. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000578>
- Ellen, H. en F. de Buissonjé (2015). Informatiedocument leefoppervlaktes; Relatie tussen welzijns- en milieuregelgeving. Lelystad, Wageningen UR (University & Research), Livestock Research, Report 849

-
- Elsgaard, L., A.B. Olsen, S.O. Petersen (2016). Temperature response of methane production in liquid manures and co-digestates. *Science of The Total Environment*. 539. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.145>
- Elzing, A., G.J. Monteny (1997). Ammonia emission in a scale model of a dairy cow house. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 40(3)
- Elzing, A., W. Kroodsmas, R. Scholtens, G.H. Uenk (1992). Ammoniakemissiemetingen in een modelsysteem van een rundveestal : theoretische beschouwingen. *Dienst Landbouwkundig Onderzoek, Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen*, rapport 92-3
- Eurofins Agro (2022a). Propionzuur. <https://eurofins-agro.com/>, geraadpleegd op 10-08-2022
- Eurofins Agro (2022b). Azijnzuur. <https://eurofins-agro.com/>, geraadpleegd op 10-08-2022
- Eurofins Agro (2022c). Boterzuur. <https://eurofins-agro.com/>, geraadpleegd op 10-08-2022
- Gollenbeek, L. J. van Gastel, F. Casu, N. Verdoes (2021a) Emissies en kosten van verschillende scenario's voor de verwaarding van varkensmest: NL Next Level Mestverwaarden, Wageningen Livestock Research, Wageningen, rapport 1331
- Gollenbeek, L. J. van Gastel, F. Casu, N. Verdoes (2021b) Emissies en kosten van verschillende scenario's voor de verwaarding van kalvermest: NL Next Level Mestverwaarden, Wageningen Livestock Research, Wageningen, rapport 1340
- Gollenbeek, L., J. van Gastel, F. Casu, I. Huisman, N. Verdoes (2022) Berekeningen emissies en economie voor verschillende scenario's voor verwaarding van rundveemest: NL Next Level Mestverwaarden, Wageningen Livestock Research, Wageningen, rapport 1372
- Gopalan, P., P.D. Jensen, D.J. Batstone (2013). Biochemical Methane Potential of Beef Feedlot Manure: Impact of Manure Age and Storage. *Journal of Environmental Quality* 42 (4). Pp1205 – 1212. <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0457>
- Groenestein, C.M., J. Mosquera, R.W. Melse (2016). Methaanemissie uit mest; Schatters voor biochemisch methaan potentieel (BMP) en methaanconversiefactor (MCF). Wageningen Livestock Research, Rapport 961.
- Hafner, S.D., C. Howard, R.E. Muck, R.B. Franco, F. Montes, P.G. Green, F. Mitloehner, S.L. Trabe, C. Alan Rotz (2013). Emission of volatile organic compounds from silage: Compounds, sources, and implications. *Atmospheric Environment* 77. Pp 827-839. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.076>
- Heetkamp, M.J.W., S.J.J. Alferink, T. Zandstra, P. Hendriks, H. van den Brand, W.J.J. Gerrits (2015). Chapter 2: Design of climate respiration chambers, adjustable to the metabolic mass of subjects. Pagina's 35–56 uit *Indirect Calorimetry: Techniques, Computations and Applications*. Wageningen Academic Publishers
- Hilgert, J.E., B. Amon, T. Amon, V. Belik, F. Dragoni, C. Ammon, A. Cárdenas, S.O. Petersen, C. Herrmann (2022). Methane Emissions from Livestock Slurry: Effects of Storage Temperature and Changes in Chemical Composition. *Sustainability* 14(16), 9934. <https://doi.org/10.3390/su14169934>
- Hilgert, J.E., C. Herrmann, S.O. Petersen, F. Dragoni, T. Amon, V. Belik, C. Ammon, B. Amon (2023). Assessment of the biochemical methane potential of in-house and outdoor stored pig and dairy cow manure by evaluating chemical composition and storage conditions. *Waste Management* 168. Pp 14 – 24. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.031>
- Hoeksma, P. (2013). Thermische voorbehandeling van rundveedrijfmest en maïsstro gevolgd door vergisting. ACRRES-Wageningen UR, Lelystad. PPO nr. 563
- Im, S., S.O. Petersen, D. Lee, D. Kim (2020). Effects of storage temperature on CH₄ emissions from cattle manure and subsequent biogas production potential. *Waste Management*. 101. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.036>
- KWIN (2022). Handboek Kwantitatieve Informatie Veehouderij 2022-2023, Wageningen Livestock Research
- Melkvee100plus (2023). Vergisten dagverse mest zeer interessant. Melkvee100plus, financieel binnenland, 16 maart. <https://melkvee100plus.nl/>, geraadpleegd op 04-07-2023
- Mesgaran, S.D., A.L.F. Hellwing, P. Lund, M. Derno, B. Kuhla, M. Heetkamp, G. Miller, D. Humphries, F. Anglard, Y. Rochette, C. Martin, T. Gardiner, M. Coleman (2020). The gas recovery test of respiratory chambers. In: Mesgaran S.D., R. Baumont, L. Munksgaard, D. Humphries, E. Kennedy, J. Dijkstra, R. Dewhurst, H. Ferguson, M. Terré, B. Kuhla (editors). *Methods in cattle physiology and behaviour – Recommendations from the SmartCow consortium*. <https://doi.org/10.5680/mcpb010>
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (2022). Ontwerp Beleidsprogramma Klimaat, juni 2022. Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, Den Haag

-
- Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (2022). Programma Stikstofreductie en Natuurverbetering 2022 – 2035. Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Den Haag, publicatienummer 22402160
- Misselbrook, T., J. Hunt, F. Perazzolo, G. Provalo (2016). Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Slurry Storage: Impacts of Temperature and Potential Mitigation through Covering (Pig Slurry) or Acidification (Cattle Slurry). *Journal of Environmental Quality*. 45(5). <http://doi.org/10.2134/jeq2015.12.0618>
- Montes, F., C.A. Rotz, H. Chaoui (2009). Process modeling of ammonia volatilization from ammonium solution and manure surfaces: a review with recommended models. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 52(5).
- Moran, J. (2005). How the rumen works, *Tropical Dairy farming: feeding management for small holder dairy farmers in the humid tropics*, Landlinks Press
- Mosquera, J., H.J.C. van Dooren, N.W.M. Ogink, E.A.P. van Well, G.J. Monteny, 2021; Monitoring van methaan-, ammoniak-, en lachgasemissies uit melkveestallen. Wageningen Livestock Research, Rapport 1286.
- Oenema, O., Velthof, G. L., Verdoes, N., Groot Koerkamp, P. W. G., Monteny, G. J., Bannink, A., van der Meer, H. G., & van der Hoek, K. W. (2000). Forfaitaire waarden voor gasvormige stikstofverliezen uit stallen en mestopslagen; gew. druk. (Alterra-rapport; No. 107). Alterra. <https://edepot.wur.nl/231023>
- Page, L.H., J. Ni, A.J. Heber, N.S. Mosier, X. Lui, H. Joo, P.M. Ndegwa, J.H. Harrison (2014). Characteristics of volatile fatty acids in stored dairy manure before and after anaerobic digestion. *Biosystems Engineering*. 118. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.11.004>
- Page, L.H., J. Ni, H. Zhang, A.J. Heber, N.S. Mosier, X. Lui, H. Joo, P.M. Ndegwa, J.H. Harrison (2015). Reduction of volatile fatty acids and odor offensiveness by anaerobic digestion and solid separation of dairy manure during manure storage. *Journal of Environmental Management*. 152. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.024>
- Patni, N.K., P.Y. Jui (1985). Volatile fatty acids in stored dairy cattle slurry. *Agricultural Wastes*. 13 (3). [https://doi.org/10.1016/0141-4607\(85\)90031-9](https://doi.org/10.1016/0141-4607(85)90031-9)
- Remmelink, G., J. van Middelkoop, W. Ouweltjes, H. Wemmenhove (2020). Handboek melkveehouderij 2020/21. (Handboek / Wageningen Livestock Research; No. 44). Wageningen Livestock Research. <https://doi.org/10.18174/529557>
- Rodhe, L., J. Ascue, A. Nordberg (2009). Emissions of greenhouse gases (methane and nitrous oxide) from cattle slurry storage in Northern Europe. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/8/1/012019>
- Sneath, R.W. (1988). The effects of removing solids from aerobically treated piggery slurry on the VFA levels during storage. *Biological Wastes*. 26 (3). [https://doi.org/10.1016/0269-7483\(88\)90164-4](https://doi.org/10.1016/0269-7483(88)90164-4)
- Sommer, S.G., G.Q. Zhang, A. Bannink, D. Chadwick, T. Misselbrook, R. Harrison, N.J. Hutchings, H. Menzi, G.J. Monteny, J.Q. Ni, O. Oenema, J. Webb (2006). Algorithms determining ammonia emission from buildings housing cattle and pigs and from manure stores. *Advances in Agronomy*. 89
- Sommer, S.G., T.J. Clough, N. Balaine, S.D. Hafner, K.C. Cameron (2017). Transformation of Organic Matter and the Emissions of Methane and Ammonia during Storage of Liquid Manure as Affected by Acidification. *Journal of Environmental Quality*. 46(3). <https://doi.org/10.2134/jeq2016.10.0409>
- Starmans, D., F. de Buissonjé, W. van Dijk, J. de Haan, M. Timmerman, C. de Visser (2015). Mest vol verwaarden, wat kan raffinage betekenen? Application Centre for Renewable Resources, PPO-658, Wageningen UR, Lelystad
- Tauseef, S.M., M. Premalatha, T. Abbasi, S.A. Abbasi (2013). Methane capture from livestock manure. *Journal of Environmental Management*. 117. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.12.022>
- Timmerman, M., H.J.C. van Dooren, G. Biewenga (2005). Mestvergistig op boerderijschaal. *PraktijkRapport Varkens 42*, Animal Science Group, Wageningen UR, Lelystad
- Timmerman, M., J.W. van Riel, I. Bisschops, M. van Eekert (2009). Optimaliseren van mestvergistig. *Rapport 243*. Animal Science Group, Wageningen UR, Lelystad
- Van Boxmeer, E.G.G., H. Schilder, N. Verdoes, P.J. Galama, G.C.C. Kupers (2023b). Samenstelling mestproducten uit innovatieve stalsystemen in de melkvee-, varkens- en kalverhouderij; Betere stal, betere mest, betere oogst. Wageningen Livestock Research, Rapport 1410.
- Van Boxmeer, E.G.G., I. Groeneveld, E. Maasdam, N. Verdoes, J.P.B.F. van Gastel (2023a). Innovatieve stalsystemen voor verwaardig van varkens-, kalver- en rundveemest; NL Next Level Mestverwaarden. Wageningen Livestock Research, Openbaar Rapport 1409.

-
- Veen, W.A.G. (2000). Veevoedermaatregelen ter vermindering van methaanproductie door herkauwers, een deskstudie. Instituut voor de Veevoeding, Lelystad
- Williams, A.G. (1984). Indicators of piggery slurry odour offensiveness. *Agricultural Wastes*. 10 (1).
[https://doi.org/10.1016/0141-4607\(84\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0141-4607(84)90016-7)
- Wood, J.D., R.J. Gordon, C. Wagner-Riddle, K.E. Dunfield, A. Madani (2012). Relationships between Dairy Slurry Total Solids, Gas Emissions, and Surface Crusts. *Journal of Environmental Quality*. 41(3).
<https://doi.org/10.2134/jeq2011.0333>

Bijlage 1 Mestkenmerken individuele monsters

Tabel B1.1 Droge stof, as, totaal stikstof (N-totaal), ammonium stikstof (N-ammonium), fosfaat en kali gehalte (gr/kg) en pH van de verschillende individuele mestfracties. Zowel de vers toegediende mestfracties als de 3 dagen oude mest aan het eind van het experiment zijn bemonsterd.

	Cel	Droge stof	As	N-totaal	N-ammonium	Fosfaat	Kali	pH
Week 1								
RD15, vers	1A	110,3	19,6	4,1	0,56	1,7	4,4	7,4
RD15, vers	1B	104,4	20,3	3,7	0,51	1,4	4,1	7,4
RD15, vers	3A	109,6	16,7	4,1	0,57	1,4	4,2	7,3
RD20, vers	3B	105,1	17,4	4,3	0,65	1,5	4,6	7,3
RD20, vers	4A	107,5	19,7	4,5	0,79	1,7	5,2	7,5
RD20, vers	4B	107,3	18,1	3,9	0,60	1,6	4,3	7,3
RD15, 3 dagen	1A	109,2	27,0	3,9	1,01	1,7	7,9	7,9
RD15, 3 dagen	1B	103,5	25,6	3,4	0,93	1,4	7,0	7,8
RD15, 3 dagen	3A	107,2	24,7	3,8	0,99	1,4	7,7	7,4
RD20, 3 dagen	3B	96,8	21,5	3,6	0,95	1,4	6,6	7,2
RD20, 3 dagen	4A	105,8	25,5	3,6	0,89	1,6	7,6	7,4
RD20, 3 dagen	4B	103,1	26,4	3,4	0,73	1,5	8,1	7,6
Week 2								
VD20, vers	1A	131,3	22,0	5,8	2,20	4,1	3,2	7,4
VD20, vers	1B	122,9	21,6	6,2	2,58	3,8	3,7	8,0
VU20, vers	3A	13,3	7,1	2,5	2,04	0,4	2,9	8,9
VF20, vers	3B	280,7	40,5	7,9	0,82	9,1	2,0	7,6
RF15, vers	4A	135,8	16,8	4,2	0,72	2,3	0,7	6,9
RF15, vers	4B	127,1	17,1	4,0	0,37	2,5	0,6	7,0
VD20, 3 dagen	1A	113,6	22,3	4,3	1,48	3,8	4,1	7,1
VD20, 3 dagen	1B	112,0	22,0	4,7	1,80	3,9	4,3	7,2
VU20, 3 dagen	3A	12,1	8,1	1,0	0,62	0,3	3,6	8,1
VF20, 3 dagen	3B	270,9	43,6	8,0	1,03	8,7	3,7	7,8
RF15, 3 dagen	4A	193,0	27,9	6,6	1,21	3,6	1,3	8,1
RF15, 3 dagen	4B	205,2	32,7	7,5	1,55	4,5	1,1	8,0
Week 3								
RU15, oud	4A	44,5	29,5	1,8	1,5	0,0	16,0	9,2
RU15, oud	4B	42,9	30,7	2,8	2,5	0,0	14,8	9,1
KD15, vers	1A	82,1	13,4	5,0	2,1	1,2	3,8	8,7
KD15, vers	1B	92,9	10,4	4,1	1,1	1,4	2,0	7,4
KU15, vers	3A	13,3	7,0	1,8	0,2	0,2	3,0	8,9
KF15, vers	3B	179,7	12,5	5,1	0,2	2,5	1,1	6,8
RU15, vers	4A	52,4	28,9	4,6	3,9	0,1	12,8	8,9
RU15, vers	4B	50,8	28,3	4,5	4,0	0,0	13,0	9,9
KD15, 3 dagen	1A	91,9	18,1	3,2	0,8	1,4	5,2	8,3
KD15, 3 dagen	1B	85,9	13,4	3,0	0,5	1,3	3,6	7,8
KU15, 3 dagen	3A	15,0	9,6	0,6	0,2	0,3	4,2	8,9
KF15, 3 dagen	3B	172,2	13,6	4,8	0,3	2,6	1,4	7,1
RU15, 3 dagen	4A	45,3	30,1	1,9	1,6	0,0	16,4	9,1
RU15, 3 dagen	4B	44,6	29,4	1,9	1,8	0,0	15,7	9,1

Bijlage 2 Uitgebreide BMP resultaten

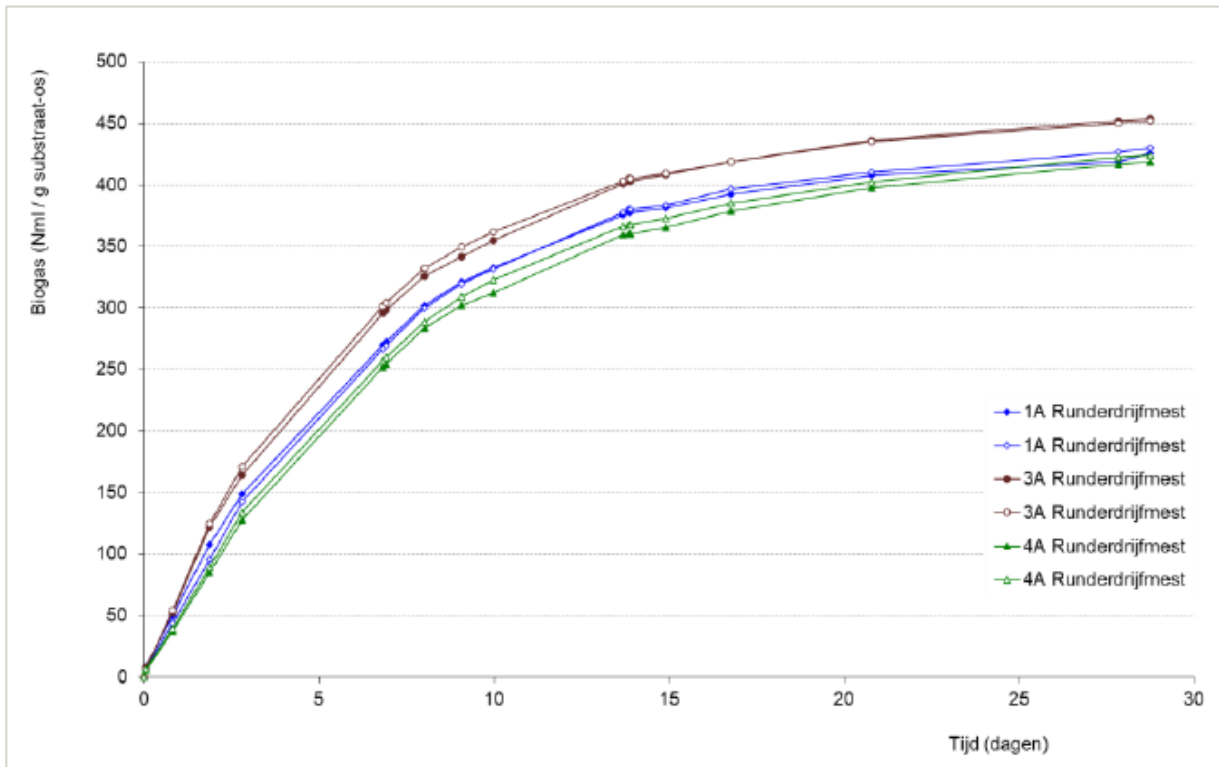
Voorafgaand aan de test zijn de pH en het droge stof- en organische stofgehalte gemeten. De resultaten zijn weergegeven in Tabel B2.1. De pH is gemeten met een dagelijks gekalibreerde pH-elektrode. Het gehalte droge stof en organische stof werd bepaald volgens de standaardmethode, met droging van de monsters bij 105°C en verassing bij 550°C.

Tabel B2.1 Karakterisering van de monsters voor BMP bepaling

Week	Cel	Monster	pH	Droge stofgehalte	Organische stofgehalte	
			-	g/kg	g/kg	% van DS
1	1A	Runderdrijfmest <i>Roerbaar</i>	7,2	109	90	83
	3A	Runderdrijfmest <i>Roerbaar</i>	6,7	113	98	86
	4A	Runderdrijfmest <i>Roerbaar</i>	7,1	116	98	85
2	1A	Varkensdrijfmest <i>Vloeibaar met dikke klonten</i>	7,3	114	95	83
	1B	Varkensdrijfmest <i>Vloeibaar met dikke klonten</i>	6,9	119	99	83
	3A	Varkensurine	8,6	13	6,4	49
	3B	Varkensfeces <i>Heel dik, maar homogeen</i>	7,0	269	230	85
	4A	Runderfeces <i>Dik, maar roerbaar</i>	6,3	132	116	88
	4A	Runderfeces <i>Dik, maar roerbaar</i>	6,4	128	112	88
3	1A	Kalverdrijfmest <i>Vloeibaar met dikke klonten</i>	8,0	84	72	85
	1B	Kalverdrijfmest <i>Vloeibaar met dikke klonten</i>	8,0	64	55	87
	3A	Kalverurine	8,2	14	7,7	55
	3B	Kalverfeces <i>Dik, maar roerbaar</i>	6,4	180	169	94
	4A	Runderurine	8,4	53	27	51
	4A	Runderurine	8,5	51	26	50

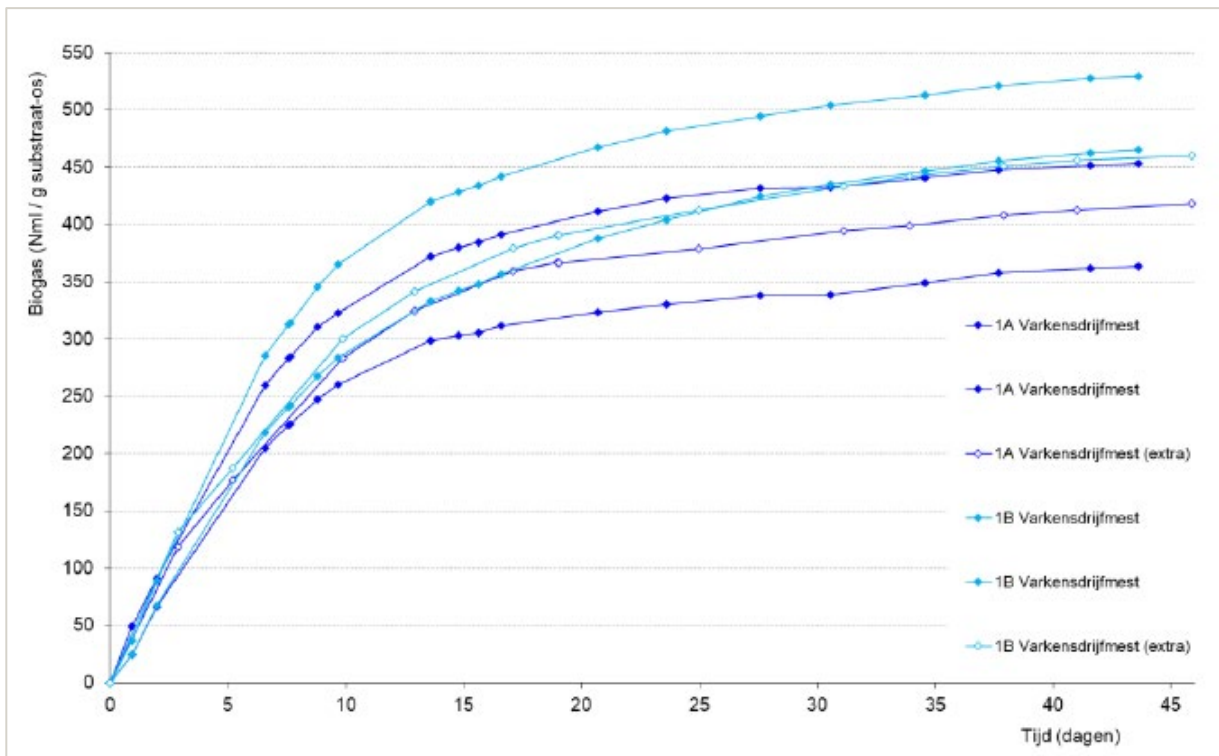
De BMP testen zijn uitgevoerd bij 35°C onder standaard (ideale) laboratoriumcondities met een niet-geadapteerd inoculum. De verkregen resultaten geven dan ook het maximale biogaspotentieel onder deze standaardcondities. Afhankelijk van de toegepaste procescondities kan de biogasopbrengst in de praktijk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

In onderstaande figuren wordt voor elke serie monsters het verloop van de biogasproductie weergegeven, in ml biogas per g substraat-OS. De resultaten zijn gecorrigeerd voor de gasproductie uit de blanco met alleen entmateriaal.

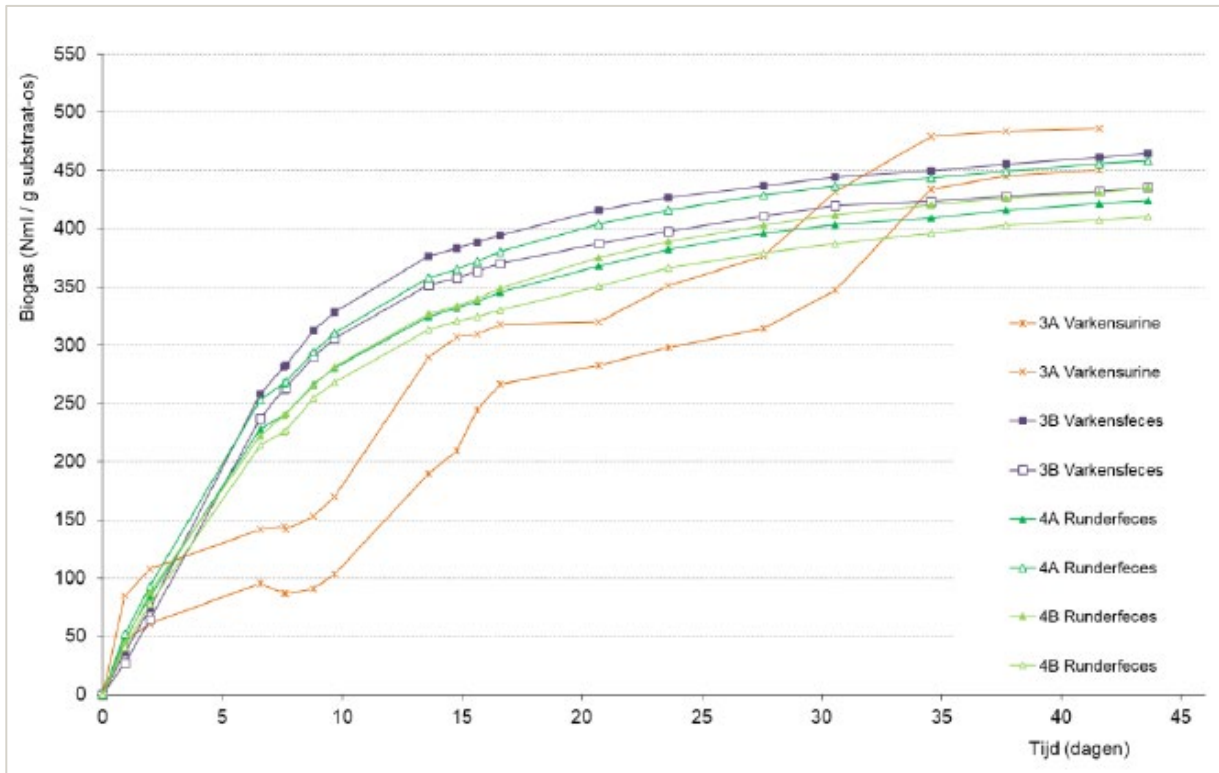


Figuur B2.1 Verloop biogasproductie (Nml biogas/gram substraat-OS) van rundveedrijfmest van week 1.

Uit Figuur B2.1 blijkt dat de drie rundveedrijfmest monsters een vergelijkbare BMP waarde geven, waarbij de rundveedrijfmest uit cel 3A iets hoger uitkomt dan de andere twee rundveedrijfmest monsters.

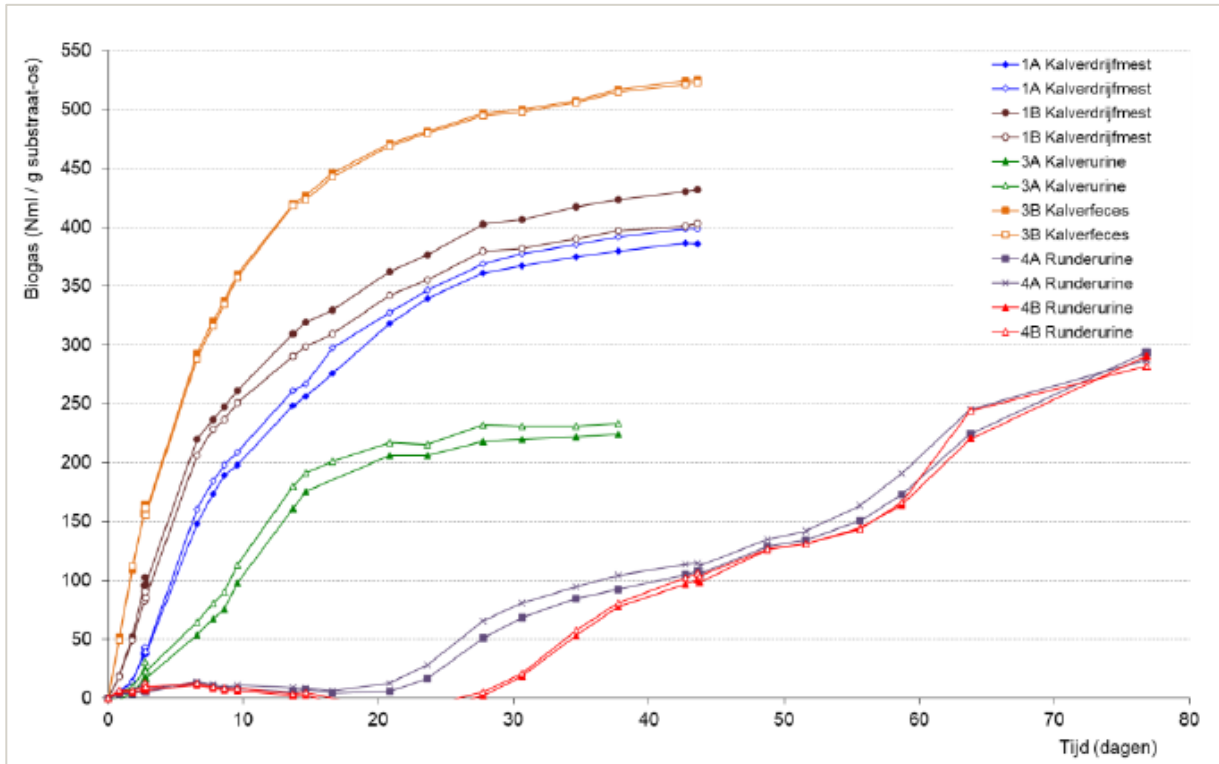


Figuur B2.2 Verloop biogasproductie (Nml biogas/gram substraat-OS) van varkensdrijfmest van week 2. Doordat de biogasproductie van deze monsters ver uit elkaar liep, is een derde fles ingezet.



Figuur B.2.3 Verloop biogasproductie (Nml biogas/gram substraat-OS) van varkensurine, varkensfeces en rundveefeces van week 2.

De biogasopbrengst van de varkens- en rundveefeces ligt dicht bij elkaar. Het monster varkensurine geeft een heel ander verloop maar komt in dezelfde orde van grootte uit. Let wel, de grafiek geeft de waarde uitgedrukt op OS-basis.

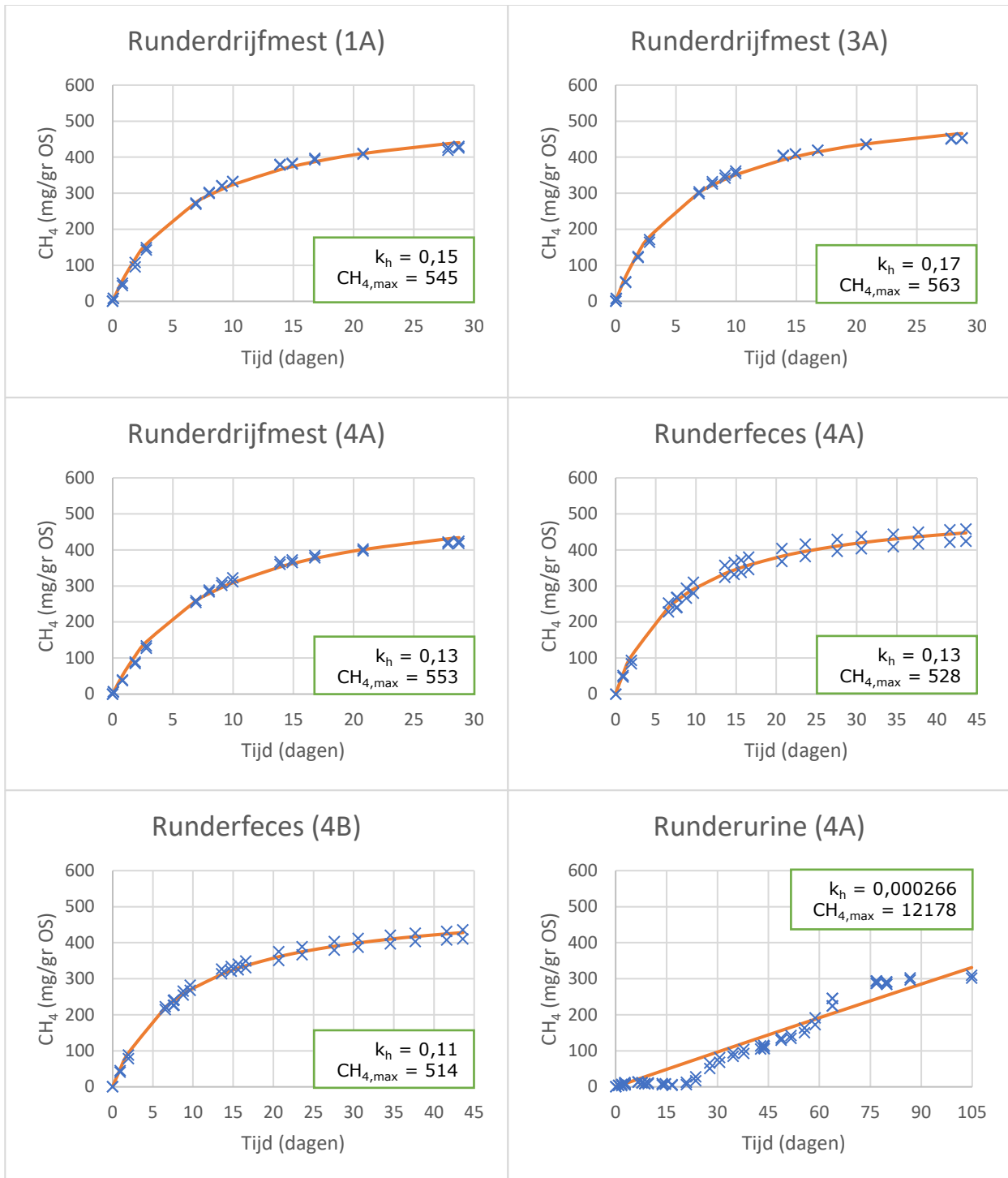


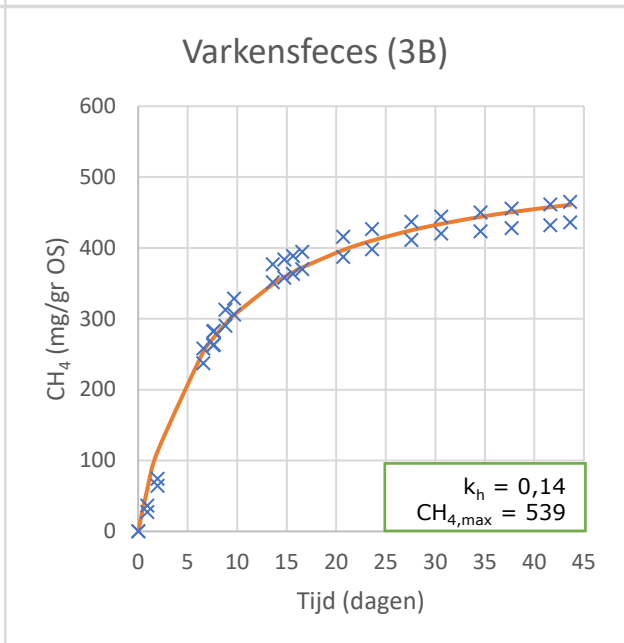
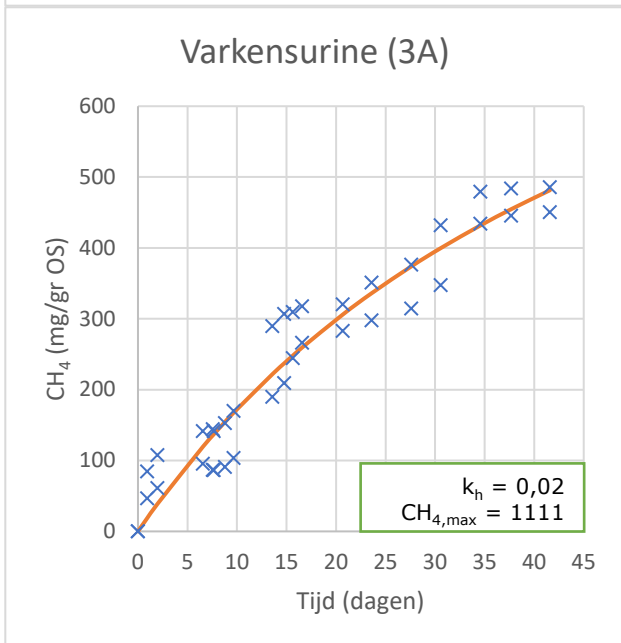
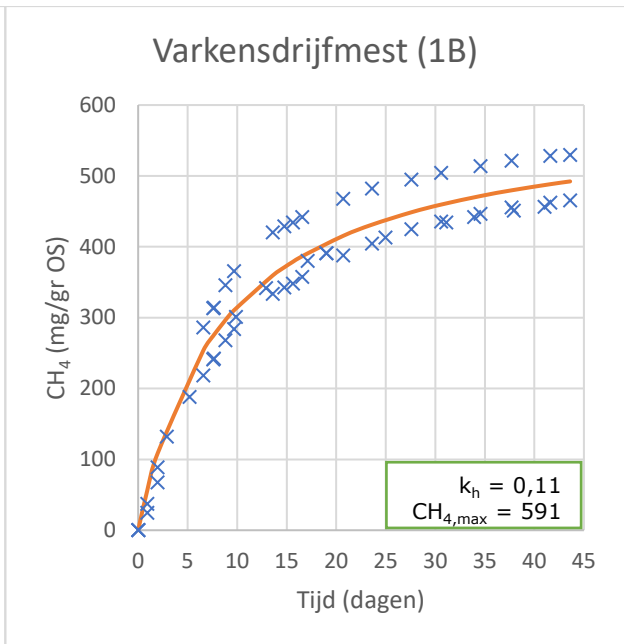
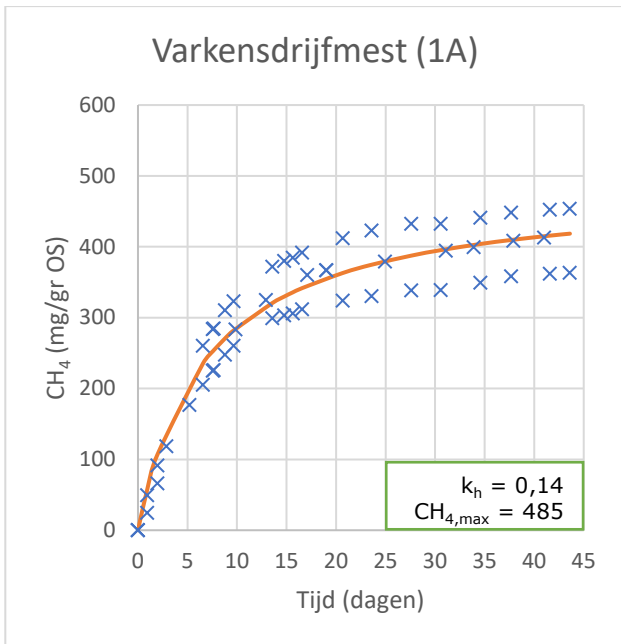
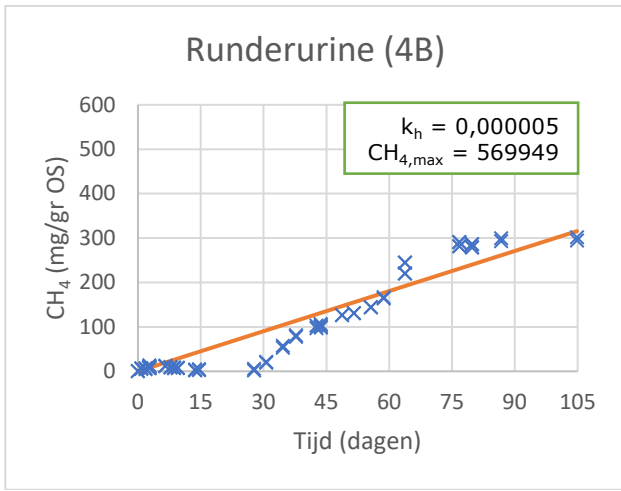
Figuur B.2.4 Verloop biogasproductie (Nml biogas/gram substraat-OS) van kalverdrijfmest, kalverurine, kalverfeces en rundvee-urine van week 3.

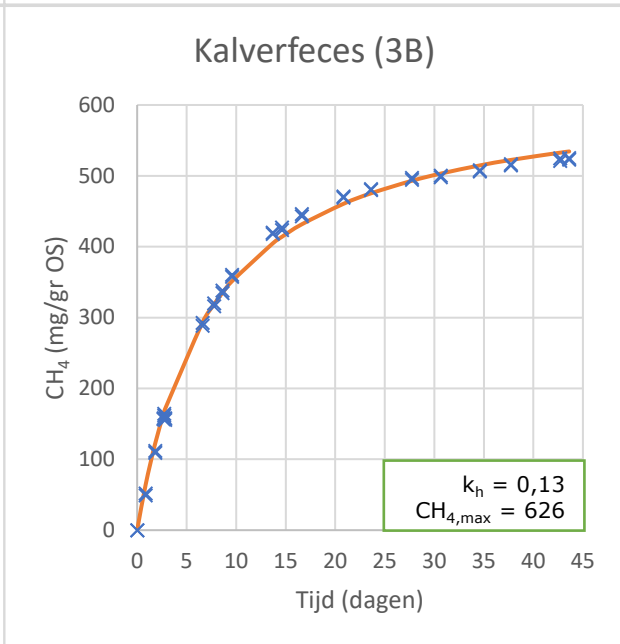
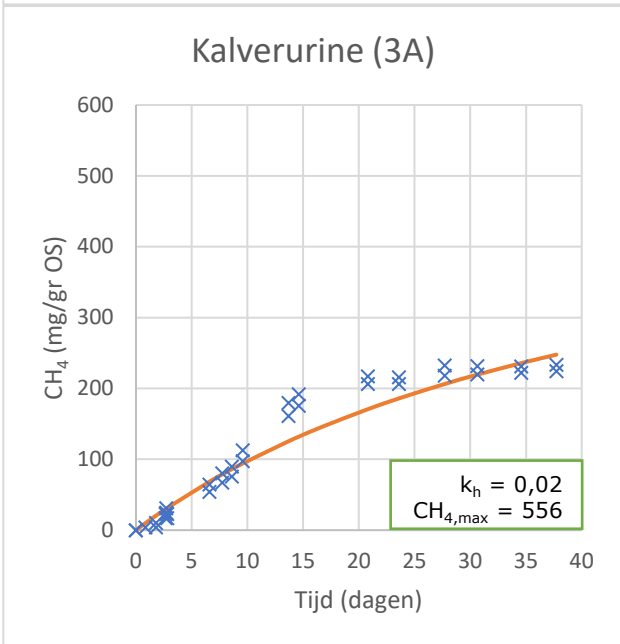
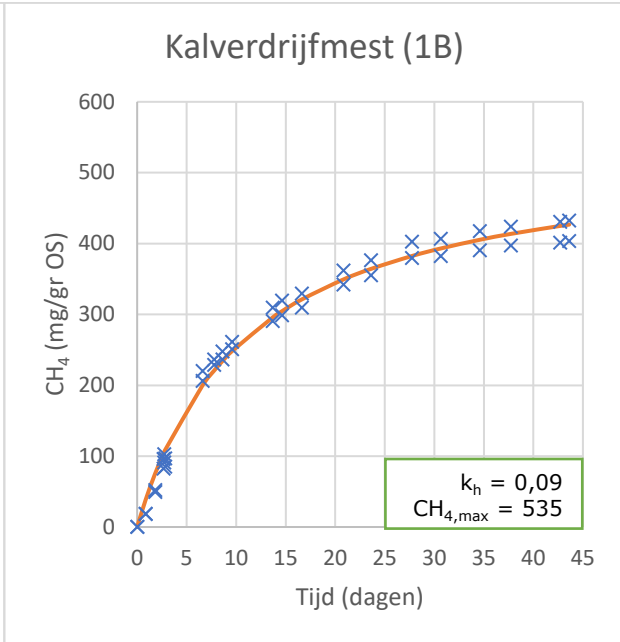
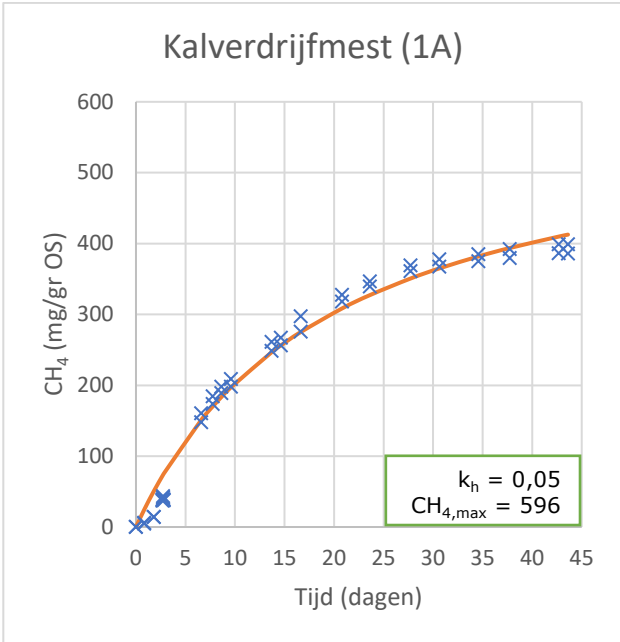
Opvallend in serie 3 zijn de monsters rundvee-urine. De biogasproductie kwam erg laat op gang en was op het moment van afsluiting van deze lab-proef (op dag 76) nog niet afgelopen.

Bijlage 3 Datafit hydrolyse constanten vergisting

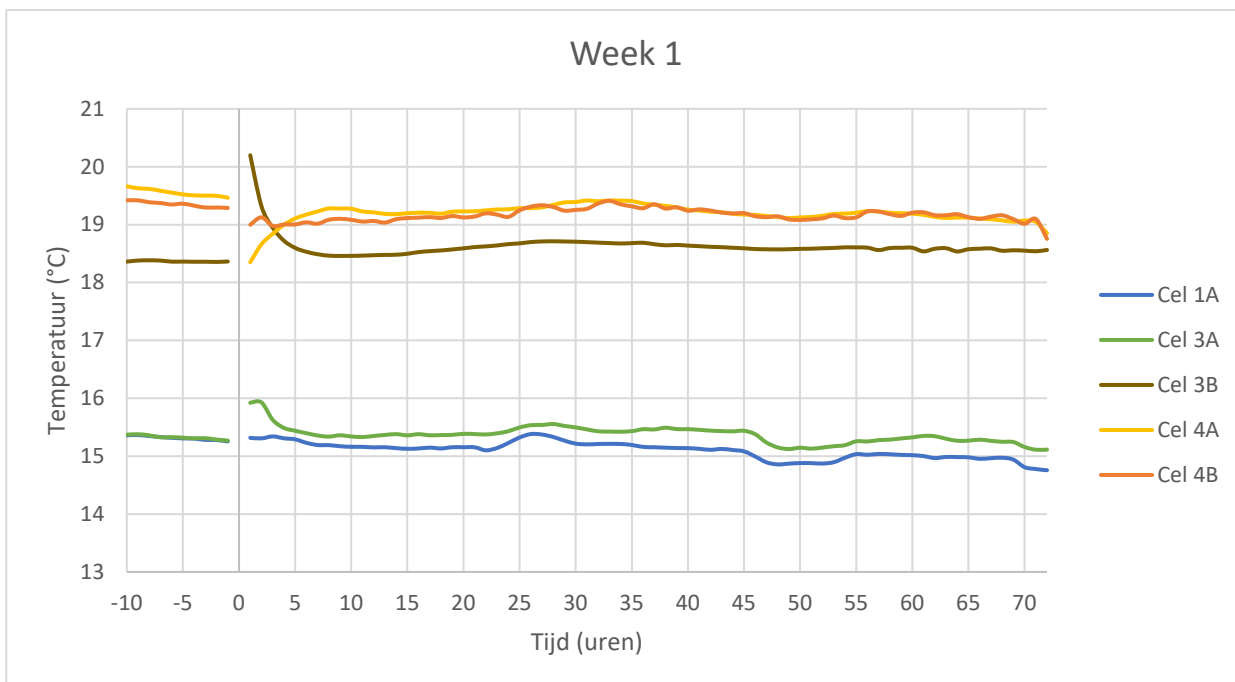
Blauwe kruisjes geven gemeten hoeveelheden CH₄ in milligram per gram organische stof weer. De oranje lijn is op basis van de kleinste-kwadraten methode gefit. In elke grafiek staat de hydrolyse constante (k_h) en potentiële methaanproductie ($CH_{4,max}$) weergegeven.



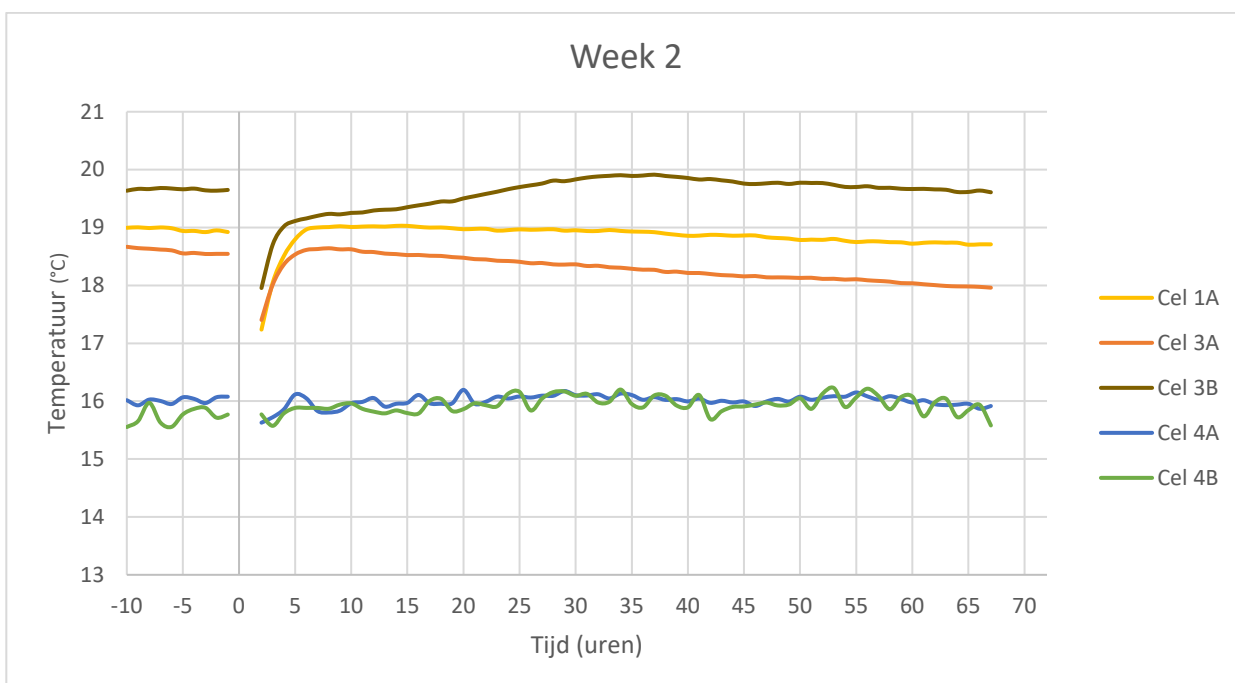




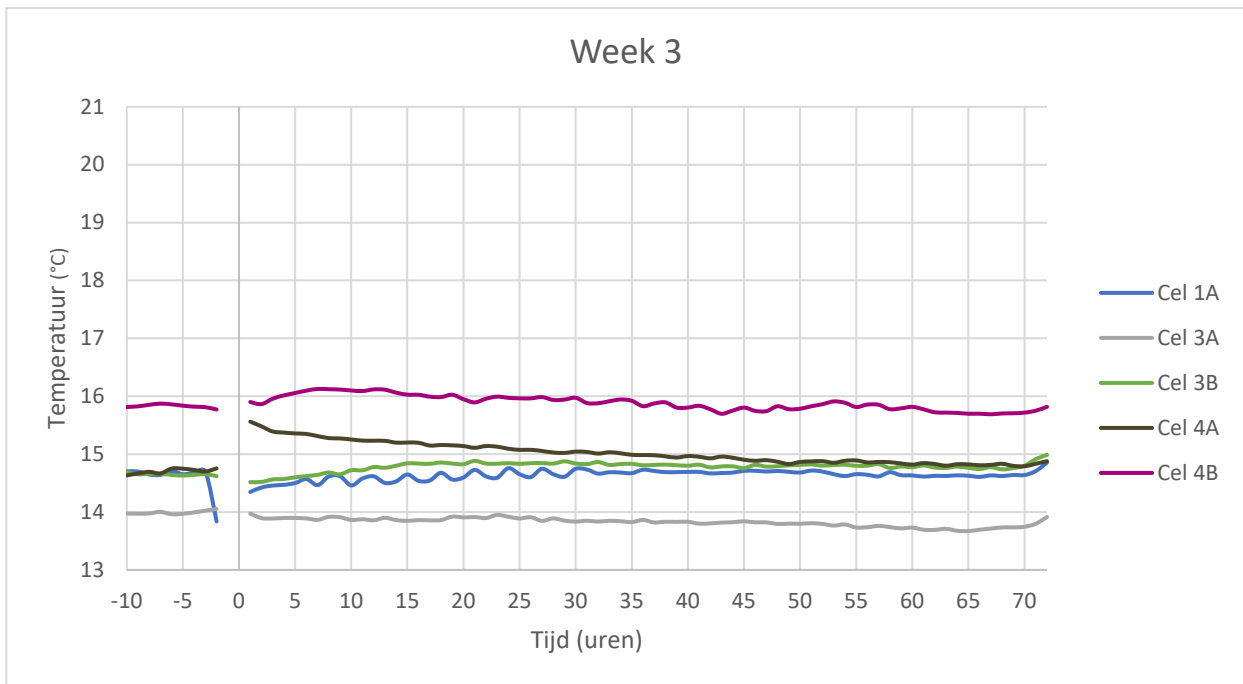
Bijlage 4 Temperatuur van de mest



Figuur B4.1 Temperatuur van de mest in cel 1A, 3A, 3B, 4A en 4B in week 1. De temperatuur van de lucht in cel 1A en 3A was ingesteld op 15°C en in cel 3B, 4A en 4B op 20°C. De temperatuursensor in cel 1B was kapot, waardoor de temperatuur van de mest in deze cel niet is gemeten. Op tijdstip 0 is de oude mest uit de put verwijderd en is de verse mest toegediend.



Figuur B4.2 Temperatuur van de mest in cel 1A, 3A, 3B, 4A en 4B in week 2. De temperatuur van de lucht in cel 1A, 3A en 3B was ingesteld op 20°C en in cel 4A en 4B op 15°C. De temperatuursensor in cel 1B was kapot, waardoor de temperatuur van de mest in deze cel niet is gemeten. Op tijdstip 0 is de oude mest uit de put verwijderd en is de verse mest toegediend.



Figuur B4.2 *Temperatuur van de mest in cel 1A, 3A, 3B, 4A en 4B in week 3. De temperatuur van de lucht in alle cellen ingesteld op 15°C. De temperatuursensor in cel 1B was kapot, waardoor de temperatuur van de mest in deze cel niet is gemeten. Op tijdstip 0 is de oude mest uit de put verwijderd en is de verse mest toegediend.*

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.

