



Perspectief van plasmatechnologie als methaan- en ammoniakemissie reducerende maatregel in de melkveehouderij

Daniel Puente-Rodriguez, Jan Vonk, Nico Verdoes

OPENBAAR
RAPPORT 1553



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Perspectief van plasmatechnologie als methaan- en ammoniakemissie reducerende maatregel in de melkveehouderij

Daniel Puente-Rodríguez¹, Jan Vonk¹ & Nico Verdoes²

¹Wageningen Livestock Research

²Nico Verdoes, Emissies & Mest, Expertise & Management

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Livestock Research en gesubsidieerd door het ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoek thema 'B1 Emissie reductie methaan veehouderij' (projectnummer BO-43.10-002-023).

Wageningen Livestock Research
Wageningen, Februari 2025

Rapport 1553

Puente-Rodríguez, D., Vonk, J. & Verdoes, N. 2025. *Perspectief van plasmatechnologie als methaan- en ammoniakemissie reducerende maatregel in de melkveehouderij*. Wageningen Livestock Research, Rapport 1553.

Samenvatting NL. Plasmatechnologie kan in de landbouw worden toegepast, met name voor de productie van een stikstofmeststof (kunstmest) eventueel met behulp van hernieuwbare energiebronnen. De focus van dit onderzoek ligt echter op de kansen en opgaven van plasmatechnologie om methaan- en ammoniakemissie uit mest in de veehouderij te reduceren. Er wordt aandacht besteed aan de chemische en biologische principes en mechanismen, mogelijke ongewenste neveneffecten (bijvoorbeeld risico's van NO_x emissies) en het implementatieperspectief op melkveehouderijbedrijven – verdienmodel, energiegebruik, beleid en juridische aspecten die de implementatie kunnen dwarsbomen of faciliteren.

Summary UK. Plasma technology can be applied in agriculture, mainly for the production of synthetic fertilizers, possibly using renewable energy sources. However, this research focuses on other aspects. This research addresses the challenges and opportunities of plasma technology to reduce methane and ammonia emissions from manure in livestock farming in the Netherlands. Attention is given to the chemical and biological principles and mechanisms, possible undesirable side effects (e.g., risks of NO_x emissions) and the implementation perspective on dairy farms in the Netherlands – business case, energy consumption, policy and legal aspects that can hinder or facilitate implementation.

1. Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/687821> 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, 2025

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 1553

Inhoud

1	Inleiding	5
1.1	Context	5
1.2	Plasmatechnologie	5
1.3	Het Haber-Boschproces	6
1.4	Doelstelling	7
2	Werkingsmechanismen plasmatechnologie	9
2.1	Fysisch-chemische principes	9
2.2	Effect van plasma op methaan- en ammoniakemissies uit mest	9
2.3	Andere toepassingsmogelijkheden van plasmatechnologie in de veehouderij – luchtreiniging	11
2.4	Dunne fracties van mest verrijken door middel van plasmatechnologie	11
2.4.1	Type plasma's	11
2.4.2	Toepassing door GEA (ProManure E295 – Manure Enricher) en N2 Applied	12
3	Methodologische aanpak	13
3.1	Deskstudie	13
3.2	Metingen aan het systeem	14
3.2.1	Bedrijfsbeschrijving	14
3.2.2	Concentratie-/emissiemetingen	15
3.2.3	Mestmonsters – reguliere mestanalyses	16
3.2.4	Mestmonsters – Actuele Methaan Productie (AMP)	16
3.3	Scenario berekening	17
4	Resultaten metingen en monsteranalyses	18
4.1	Resultaten concentratiemetingen aan de uitlaat van de plasma unit	18
4.1.1	Van concentraties naar inschatting van emissies	20
4.1.2	Discussie - Concentraties in perspectief	21
4.2	Resultaten AMP-analyses	22
4.3	Resultaten mestanalyses	22
5	Implementatie aspecten	24
5.1	Energievraag	24
5.1.1	Plasma <i>versus</i> Haber-Bosch	24
5.1.2	Plasma op praktijkbedrijven	25
5.2	Kosten en baten	26
5.3	Inpasbaarheid in de melkveehouderij	28
5.4	Institutionele aspecten	29
5.4.1	Inpasbaarheid binnen de (nationale) wet- en regelgeving	29
5.4.2	RENURE	31
5.4.3	Biologische landbouw	32
6	Scenario berekeningen	33
6.1	Beschrijving van de scenariobedrijven	33
6.1.1	Scenario 1 - Het gemiddelde melkveebedrijf + plasma unit	34
6.1.2	Scenario 2 – Een groot melkveebedrijf met vergister + plasma unit	34
6.2	Uitgangspunten voor de plasma unit	35
6.3	Resultaten modelberekening emissies	36

6.3.1	Berekende ammoniakemissies	36
6.3.2	Berekende methaanemissies uit mest	37
6.3.3	Berekende totale broeikasgasemissies uit mest	38
6.4	Resultaten modelberekening economie	38
6.5	Discussie modelberekening	40
7	Conclusies	42
	Dankwoord	44
	Literatuur	45
Bijlage 1	Overzicht NEN-nummers bij de gebruikte analysemethoden van het WLR- Servicelaboratorium	48
Bijlage 2	Protocol for estimation of methane production rates in manure	49
Bijlage 3	Uitgangspunten voor mestopslag en -aanwending in de scenario berekeningen	52

1 Inleiding

1.1 Context

In hun dagelijkse bedrijfsvoering worden veehouders niet alleen geconfronteerd met vragen over bijvoorbeeld de winstgevendheid van volgend jaar, maar ook met lange termijn opgaven die de hele maatschappij aangaan, zoals klimaatverandering of het verlies aan biodiversiteit. Deze opgaven worden vertaald door beleidsmakers en andere maatschappelijke actoren in doelen die de manoeuvreerruimte van veehouderijbedrijven mede bepalen.

Mest is een bron van broeikasgas- en ammoniakemissies, maar het is ook een waardevolle bron van mineralen en organische stof (OS) voor een gezonde bodem. De bodemkwaliteit van met name landbouwgronden staat onder druk, onder andere vanwege een overmatig gebruik van dierlijke mest en kunstmeststoffen en (op sommige grondsoorten) te weinig aanvoer van OS, terwijl uitspoeling van mineralen naar het grond- en oppervlaktewater moet worden voorkomen. In het kader van klimaatverandering zijn er afspraken gemaakt om broeikasgasemissies te reduceren – denk aan het Akkoord van Parijs en de daaropvolgende Klimaatwet. Ook moet de ammoniakemissie fors omlaag vanwege de negatieve gevolgen voor de biodiversiteit. De 'Green Deal' van de EU pleit voor de vermindering van nutriëntenverlies met 50% in 2030.

In het kader van de programmatische aanpak binnen de Klimaatvelop – Integraal Aanpakken van het ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur, om broeikasgasemissies (met name methaan) in de veehouderij te reduceren, is Wageningen Livestock Research (WLR) in samenwerking met bedrijven en andere organisaties bezig om (bijna) praktijkrijpe technieken en maatregelen te identificeren, te combineren, en in de praktijk te testen en te bemeten (zie bijvoorbeeld, Puente-Rodríguez et al., 2022; 2023; Maasdam et al., 2024). Voorliggend rapport focust op een nieuwe optie: plasmatechnologie.

1.2 Plasmatechnologie

Plasma komt uit het Grieks 'πλάσμα' wat 'vormbare stof' betekent. Samen met vast, vloeibaar en gas wordt plasma gezien als een aparte (vierde) aggregatietoestand. Eigenlijk is het een fase waarin de deeltjes van een gas zijn geïoniseerd.

Plasmatechnologie wordt steeds vaker toegepast binnen verschillende domeinen. Zo wordt plasma bijvoorbeeld toegepast voor het modifieren van textiel voor medische toepassingen (Tessier, 2013). Ook wordt deze technologie gebruikt om artefacten te reinigen en te beschermen. Er is bijvoorbeeld onderzoek uitgevoerd naar het vermogen van plasma voor het desinfecteren van oppervlakken waarop voedsel wordt behandeld (Shaw et al., 2015) en van voedselverpakkingen (Pankaj et al., 2014), en ook de directe en indirecte behandeling van voedsel (Graves et al., 2019, en referenties erin). Vanwege dit reinigings-/desinfecterende vermogen wordt er ook gekeken naar de potentie om mest te hygiëniseren (Muhmood et al., 2021). Plasma-geactiveerd water is een onderzoeksveld vanwege de aangetoonde capaciteit van plasma om kleurstoffen en resten van geneesmiddelen uit het water te verwijderen (Magureanu et al., 2015). Daarnaast wordt het ook toegepast voor de binding van stikstof (denk aan ammoniak) en CO₂, maar ook voor de binding van methaan. Yao et al. rapporteerden al in 2001 over de mogelijkheid om door middel van plasmatechnologie methaan als bron te gebruiken om waardevolle producten als synthesesgas, waterstof, methanol of acetyleen te produceren. Ze dachten dat dit speciaal geschikt gemaakt kon worden voor kleinschalige locaties waar conventionele technologieën niet rendabel zijn. Momenteel wordt ook fundamenteel onderzoek uitgevoerd (bijvoorbeeld aan de TU Eindhoven) naar de omzetting van methaan, CO₂ en stikstof uit mest tot nieuwe componenten met plasmatechnologie (An et al., 2021; Lee et al., 2021).

Binnen het landbouwdomein wordt plasmatechnologie gepositioneerd als onderzoeksveld in het kader van de N-fixatie om onder andere kunstmestachtige stoffen te produceren, met namen als: 'plasma activated water', 'nitrogen enriched organic fertilizer', 'plasma activated organic fertilizer', etc. (Ingels & Graves, 2015; Graves et al., 2019; Li et al., 2018; Lee et al., 2021; Mousavi et al., 2022a; Robinson & Stapelmann, 2024)¹. N-kunstmest wordt nu voornamelijk met het energie intensieve Haber-Bosch (H-B) proces geproduceerd. Volgens sommige schattingen bedraagt dit proces 1 à 2% van het totale wereldwijde energieverbruik². Om op industriële schaal met het H-B proces te kunnen concurreren wordt energie-efficiëntie als de belangrijkste focus van het onderzoek rondom plasmatechnologie benoemd. Er wordt geprobeerd om van plasmatechnologie een veel energiezuiniger proces te maken (Li et al., 2018). De techniek voor deze toepassing staat hoog in de 'Technology Readiness Level' systematiek. Er worden bijvoorbeeld al plasmareactoren ontwikkeld om N-kunstmest te maken met behulp van zonlicht, water en lucht, en met lage kosten, speciaal bedoeld voor kleinschalige boeren in Afrikaanse landen³.

Plasmatechnologie vindt al haar weg naar de Nederlandse landbouw- en veehouderijpraktijken. Zie bijvoorbeeld de activiteiten en producten van het bedrijf VitalFluid⁴. N2 Applied⁵ is een Noors bedrijf dat een plasmatechnologie unit ontwikkelt om stikstof uit de lucht te halen via een plasmaproces en deze te fixeren in dunne fracties van mest. Het bedrijf reduceert daarmee de ammoniak- en methaanemissies uit dunne fracties en gebruikt de extra stikstof (in de vorm van nitraat) als meststof. De buitenlucht bestaat voor 78% uit stikstofgas en voor ca. 21% uit zuurstofgas en deze gassen worden dan in de vorm van stikstofoxiden aan de dunne fractie van drijfmest of digestaat toegevoegd. Het resultaat is een ammoniumnitraat meststof, een 'stikstof verrijkte organische meststof' ('nitrogen enriched organic fertilizer – NEO'). Het bedrijf voert momenteel testen uit op verschillende locaties (met melkvee- en varkensmest) in West-Europa, bijvoorbeeld in Noorwegen en in samenwerking met Arla in het Verenigd Koninkrijk⁶. Het bedrijf voert ook een project uit bij akkerbouwbedrijf Van Den Borne Aardappelen⁷ in Reusel, Noord-Brabant. Op experimentele basis wordt een klein deel van de mest die op dit bedrijf wordt gebruikt met een N2 Applied unit behandeld voorafgaand aan de toediening, bedoeld om kunstmest te besparen. Verder is het bedrijf recent een partnerschap aangegaan met het Duitse bedrijf GEA voor het produceren en distribueren van plasma units⁸ voor het verrijken van mest. In 2023 heeft GEA via CONO Kaasmakers een samenwerkingsverband met Unilever gesloten. Unilever wil bij 4 bedrijven testen of een plasma unit de CO₂ voetafdruk van hun producten kan verkleinen⁹. Op één van deze bedrijven zijn in december 2023 door WLR een aantal verkennende waarnemingen gedaan, zie Hoofdstuk 4.

1.3 Het Haber-Boschproces

In deze rapportage zal verschillende keren verwezen worden naar de meest gangbare methode om N uit de lucht te fixeren voor de productie van kunstmest: het Haber-Boschproces. Daarom volgt hier eerst uitleg over het H-B proces. Kunstmeststikstof geproduceerd met het H-B proces combineert meestal stikstofgas (N₂) uit de lucht met waterstofgas (H₂) uit een proces waarin aardgas een belangrijke rol speelt. Dawson en Hilton (2011) melden dat in het recente verleden sommige onderzoekers claimen dat de natuurlijke fixatie van stikstof¹⁰ voldoende N kan opleveren om de huidige wereldbevolking te voeden (Goulding et al., 2009), terwijl anderen (Erisman et al., 2008; Dawson & Hilton, 2011), na berekeningen te hebben uitgevoerd concludeerden dat door natuurlijke N-fixatie maar de helft van het benodigde voedsel kan worden geleverd. In deze context, illustreren ze (Dawson & Hilton, 2011) dat de vraag naar kunstmest nauw samenhangt met

¹ [Microsoft Word - Abstract Book.docx \(solvayinstitutes.be\)](#) (geraadpleegd mei 2023).

² In Nederland wordt 7% van het totale gasverbruik gebruikt voor de productie of kunstmest [vm78q7bh20zt.pdf](#) (geraadpleegd oktober 2024).

³ [HOME | Mysite \(project-africa.info\)](#) (geraadpleegd mei 2023).

⁴ [Natural liquid nitrogen fertilizer – Organic for plants? | VitalFluid](#) (geraadpleegd mei 2024).

⁵ [Home - N2 Applied](#) (geraadpleegd mei 2023).

⁶ [Arla launches UK Innovation Farm and announces latest research trial \(arlafoods.co.uk\)](#) (geraadpleegd mei 2023).

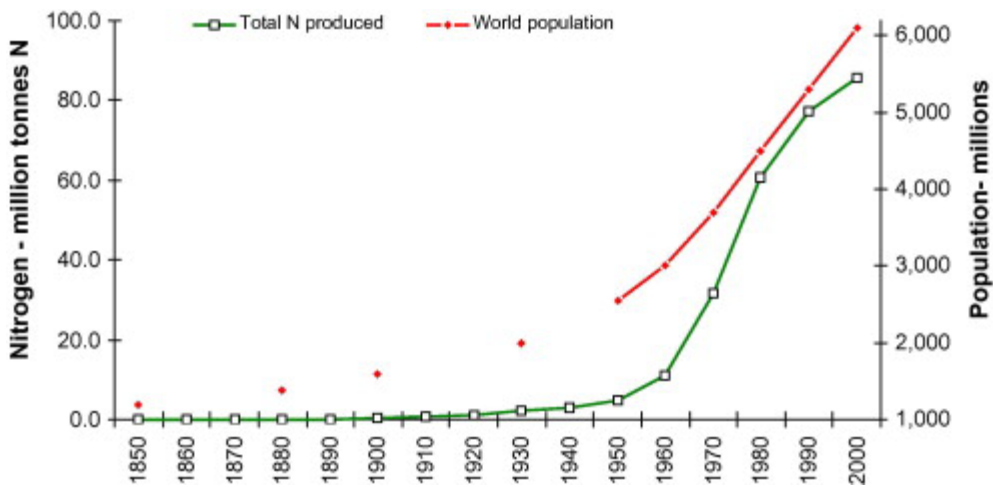
⁷ [Van Den Borne Aardappelen](#) (geraadpleegd mei 2023).

⁸ [GEA at the EuroTier 2022 | Sustainable farming, N2 Applied in partnership with GEA | Produce your own fertiliser while reducing emissions](#) (geraadpleegd mei 2023). [Uw eigen duurzame meststoffen produceren | GEA ProManure E2950](#) (geraadpleegd maart 2024).

⁹ [GEA partners with Unilever to improve sustainability on dairy farms](#) (geraadpleegd oktober 2023).

¹⁰ Bijvoorbeeld zoals die wordt bewerkstelligd door Rhizobium-bacteriën in combinatie met peulvruchten.

De bevolkingsgroei en toenemende welvaart waardoor de wereldwijde vraag naar dierlijke producten stijgt, zie Figuur 1.



Figuur 1 Productie van stikstofkunstmest in verhouding tot de wereldbevolking (Dawson & Hilton, 2011).

In 2021 bedroeg het Nederlandse verbruik van kunstmest 213 miljoen kg N¹¹. Ruim 90% hiervan wordt binnen de landbouw gebruikt. Emissies hieruit bedroegen 9,5 miljoen kg NH₃, 5,7 miljoen kg NO en 3,6 miljoen kg N₂O (Emissieregistratie, 2023).

Van de totaal geproduceerde reactieve stikstof die is gebruikt in de landbouw bereikt maar een fractie de keukentafels vanwege de verliezen van stikstof in de vorm van met name ammoniak die optreden in mestmanagementprocessen (Smil, 2002; Graves et al., 2019).

Het H-B proces wordt uitgevoerd met behulp van aardgas met de bijbehorende broeikasgasemissies. Vanwege klimaatverandering wordt er op verschillende fronten (beleid, industrie¹², etc.) gewerkt aan het terugdringen van de koolstofintensiteit van de kunstmestproductie. Daardoor is de verwachting dat de productie van N-kunstmest door middel van het H-B proces in de komende jaren onder druk zal komen te staan. Plasmatechnologie wordt een interessant alternatief, onder andere vanwege de mogelijkheid om energie uit hernieuwbare bronnen te kunnen gebruiken voor kunstmestproductie, waardoor er momenteel veel wordt geïnvesteerd in R&D.

1.4 Doelstelling

Plasmatechnologie kan in de landbouw worden geïmplementeerd, vooral om kunstmest te produceren. De focus van dit onderzoek ligt echter op andere aspecten. Het doel van dit onderzoek is het verkrijgen van inzicht in de kansen en opgaven van plasmatechnologie om methaan- en ammoniakemissie uit mest in de veehouderij te reduceren. Er wordt aandacht besteed aan de chemische en biologische principes en mechanismen, mogelijke ongewenste neveneffecten (bijvoorbeeld risico's op NO_x emissies) en het implementatieperspectief op melkveehouderijbedrijven – verdienmodel, energiegebruik, beleid en juridische aspecten die de implementatie kunnen dwarsbomen of faciliteren.

Hoofdstuk twee bespreekt (de resultaten van een deskstudie naar) de werkingsmechanismen van plasmatechnologie op emissies uit mest, evenals op verschillende toepassingen van plasma en de werking van de hier bestudeerde plasma unit.

¹¹ <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/83475NED/table?ts=1686731272514> (geraadpleegd december 2023).

¹² DEF 2023 Decarbonisation Roadmap.indd (fertilizerseurope.com) (geraadpleegd april 2024).

Hoofdstuk drie presenteert de methodologische aanpak om de doelstellingen te bereiken. Hoofdstuk vier beschrijft de resultaten van de metingen en mestanalyses die op een melkveebedrijf zijn uitgevoerd. Hoofdstuk vijf gaat dieper op in een aantal aspecten die relevant zijn voor de implementatie van deze technologie in de veehouderij (energievraag, kosten, inpasbaarheid en institutionele aspecten). In Hoofdstuk zes worden modelberekeningen uitgevoerd voor twee scenario's/bedrijven om een beeld te krijgen van de potentie van plasmatechnologie. In het laatste hoofdstuk worden de meest relevante inzichten uit deze evaluatie puntsgewijs samengevat.

2 Werkingsmechanismen plasmatechnologie

Dit hoofdstuk richt zich op de werkingsmechanismen (Paragraaf 2.1) en effecten van plasmatechnologie op de ammoniak- en methaanemissies uit mest (Paragraaf 2.2). Verder wordt ook kort ingegaan op het mogelijk toepassen van plasma in luchtwasininstallaties (Paragraaf 2.3). Tegen de achtergrond van het Haber-Boschproces om kunstmest te produceren, wordt in Paragraaf 2.4 de meest gangbare toepassing van plasma uitgelegd om mest te verrijken. De basis van de GEA-N2 Applied plasma unit wordt ook uitgelegd.

2.1 Fysisch-chemische principes

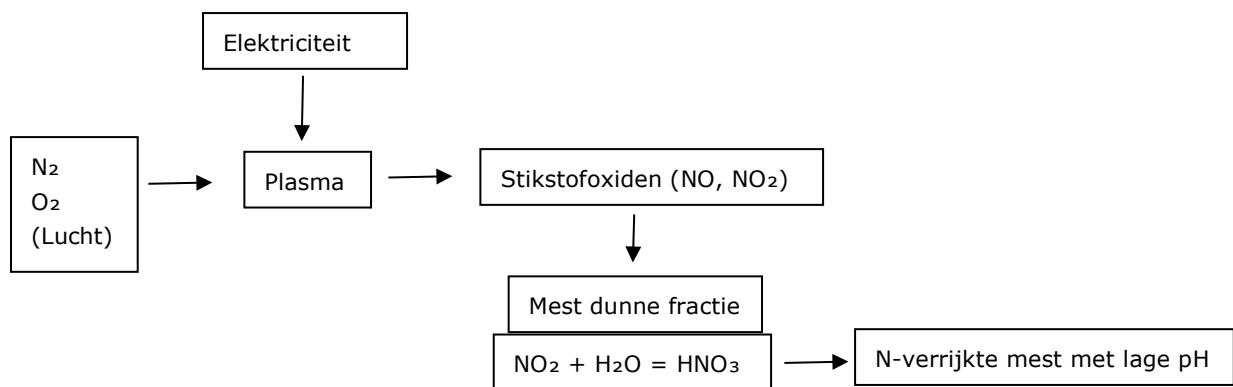
Het concept 'plasma-activering' van vloeistoffen, bijvoorbeeld water (of dunne fracties van mest in dit geval), is niet nieuw (Lukes et al., 2014). Onderzoekers begrepen dat de door plasma gegenereerde soorten radicalen, elektronen en ionen zeer snel zouden reageren op de gas-vloeistofinterface. Deze reacties kunnen betrekking hebben tot 'near-surface liquid' (bijvoorbeeld organische) soorten of ze kunnen betrekking hebben op het oplossen van radicalen soorten in de gasfase in het water. Bovendien kunnen minder reactieve chemische species die in de plasma- of gasfase worden gevormd, in het water oplossen en gedurende langere tijd reageren. Ten slotte kunnen relatief stabiele species zich in de loop van de tijd in het water ophopen (Graves et al., 2019).

Hier wordt de argumentatie van Graves et al. (2019) letterlijk gevolgd. Hydroxylradicaal (OH·), stikstofmonoxideradicaal (NO·) en stikstofdioxideradicaal (NO₂·) zijn meestal de meest belangrijke luchtplasma-gegenereerde chemische soorten. OH· zal recombineren bij de gas-vloeistofinterface om waterstofperoxide (H₂O₂) te vormen, OH· + OH· → H₂O₂. Waterstofperoxide heeft een zeer hoge oplosbaarheid in water. In de gasfase kan NO reageren met O₂ om NO₂ te vormen en NO₂ kan reageren met H₂O om salpeterzuur (HNO₃) te vormen.

Daarbij leiden deze chemische reacties tot zuren die de zuurgraad van de vloeistof verlagen. Bijvoorbeeld, als er geen buffers zijn, daalt de pH van met luchtplasma behandeld water meestal tot een pH van tussen 3 en 4 waardoor ammoniak wordt omgezet in ammonium en ammoniumnitraat.

2.2 Effect van plasma op methaan- en ammoniakemissies uit mest

De plasma unit van N2 Applied en GEA gebruikt een door elektriciteit aangedreven luchtplasma dat stikstof (N₂) en zuurstof (O₂) uit de buitenlucht haalt om stikstofmonoxide (NO) te creëren. NO wordt geoxideerd onder atmosferische omstandigheden om NO₂ te vormen (Ingels & Graves, 2015). Als NO₂ in water wordt opgelost, ontstaat voornamelijk salpeterzuur ($3 \text{ NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ HNO}_3 + \text{NO}$, in waterige fase nitraatanion NO₃⁻) dit wordt gebruikt om stikstofhoudende mest of ander organisch afval/stromen te behandelen. Door de pH te verlagen (naar tussen circa 5 en 6) wordt vluchtige ammoniak omgezet in ammonium en in het niet-vluchtige ammoniumnitraat (NH₃ + HNO₃ → NH₄NO₃). Hierdoor wordt de mest met N verrijkt (het nitraat) (Graves et al., 2019) en zal er minder stikstof (ammoniak) worden uitgestoten, zie Figuur 2 voor een gesimplificeerde weergave van het proces.



Figuur 2 Gesimplificeerde weergave plasmatoepassing op (dunne fracties van) mest.

De literatuur rapporteert ook dat de toepassing van plasmatechnologie kan bijdragen aan de vermindering van methaan- en ammoniakemissies uit mest (Graves et al., 2019). Door (dunne fracties van) mest met plasmatechnologie te behandelen wordt deze aangezuurd tot een pH niveau rondom 5,5. Mest aanzuren is een bekend principe/maatregel om methaan- en ammoniakemissies te reduceren.

De door plasmatechnologie gevormde radicalen kunnen opgeloste organische verbindingen oxideren, en hebben dus een biocide activiteit waardoor micro-organismen worden geïnactiveerd of gedood. Het aanzurende effect van plasmatechnologie werkt op de methanogene micro-organismen, die onder anaerobe omstandigheden de organische stof in mest in methaan omzetten. Voor een beschrijving van dit proces zie bijvoorbeeld Puente-Rodríguez et al., 2022.

Bij een zuurgraad van pH < 6 in de stal en rond pH 6,5-7 bij uitrijden worden significante reducties van de ammoniak- en de methaanemissie uit mest bereikt (Petersen et al., 2012; Petersen et al., 2014; Fangueiro et al., 2015; Habtewold et al., 2018; Im et al., 2021; Kasper et al., 2022). In digestaat is meer vrij ammoniak beschikbaar (Holly et al., 2017), waardoor de ammoniakverliezen daar potentieel hoger zijn en dus ook hogere reducties behaald kunnen worden.

Door (de-)nitrificatieprocessen ontstaan in mest ook broeikasgasemissies in de vorm van lachgas (N₂O). Een molecuul N₂O heeft een 265 keer sterker broeikasgaseffect dan een molecuul CO₂. N₂O wordt door microben gegenereerd als ammoniak in nitraat (nitrificatie) wordt omgezet, en het komt vrij tijdens het proces van het omzetten van nitraat in stikstof (denitrificatie). De biocide activiteit van het plasma en de vorming van salpeterzuur om mest aan te zuren, waardoor het anders vluchtige ammoniak wordt vastgehouden, vermindert zowel nitrificatie als denitrificatie en de daarmee gepaarde vorming van lachgas. Echter is er ruimte voor verdere verbetering door het ontwerp van plasma reactoren te optimaliseren (Vervloessem et al., 2020). Verder in de mestketen is daarnaast gerapporteerd dat bij aanwending van NEO de lachgasemissie hoger (factor 4) zou kunnen uitvallen dan bij gebruik van reguliere varkensmest (veldproef, Lloyd et al., 2023). Dit kunnen wel belangrijke neveneffecten zijn die verder onderzocht moeten worden.

Tijdens mestmanagement gaat N verloren als NH₃. Bij plasmabehandeling wordt dit voorkomen en onder andere als ammoniumnitraat in de mest vastgelegd voordat deze op het land wordt uitgereden. Tijdens de plasmageneratie of in het proces gevormde NO en/of een overmaat aan NO₂ kunnen echter emitteren. Daarom is onderzoek naar deze toepassing belangrijk.

2.3 Andere toepassingsmogelijkheden van plasmatechnologie in de veehouderij – luchtreiniging

Een andere mogelijke toepassing van plasmatechnologie in het veehouderijdomein is het behandelen van (stal-)lucht met plasma. Nayak et al. (2020) rapporteren bijvoorbeeld dat door middel van luchtplasma luchtweginfectieziekten in varkensstallen voorkomen kunnen worden. De lucht kan gereinigd worden door ionisatie. Plasma en elektrostatische filtratie zijn de twee hiervoor gebruikte vormen. In een literatuurstudie die recent door TNO is uitgevoerd (Kompatscher & Traversari, 2022) wordt beargumenteerd dat plasma in deze context vooral wordt gebruikt voor het verwijderen van fijnstof, en gecombineerd met een oxidatief proces, het ook mogelijk maakt om vluchtige organische stoffen af te breken.

De literatuur meldt een knelpunt van koud plasma voor het luchtreinigen: het hogere energiegebruik dan andere technologieën met dezelfde functie. En dus dat op dit terrein meer onderzoek nodig is en ook op het terrein van de vorming van schadelijke bijproducten (O_3 , NO_x , formaldehyde, etc.) en de verminderde performance bij 'vergiftigde' katalysator (gasmoleculen die onomkeerbaar adsorberen aan de actieve zijde van de katalysator) (Zhang et al., 2011; Kompatscher & Traversari, 2022).

Deze technologie zou ook de ammoniak- en methaanemissies uit de stallucht kunnen neutraliseren. Momenteel wordt onderzoek uitgevoerd en worden systemen ontwikkeld die relatief snel in de veehouderij toegepast zouden kunnen worden (zie bijvoorbeeld Slaets et al., 2023; Meng et al., 2024)¹³. Deze toepassing wordt in dit rapport niet verder besproken maar is wel een ontwikkeling om, vanuit een veehouderijperspectief, in de gaten te houden.

2.4 Dunne fracties van mest verrijken door middel van plasmatechnologie

2.4.1 Type plasma's

Er worden verschillende type plasma's gebruikt voor de synthese van NO_x : thermische plasma, 'koud' plasma en 'warm' plasma. Onder thermische plasma zijn 'electric arc' of vonkontlading bekende voorbeelden. Het theoretische energieverbruik van thermisch plasma is hoog waardoor andere types plasma vaker worden gebruikt (Li et al., 2018). Koud plasma is een niet-thermisch plasma dat meestal op kamertemperatuur wordt uitgevoerd en de energiebehoefte is dan ook lager dan bij thermisch plasma (ibid.). Echter een hoog energie-efficiënt proces is volgens Li et al. (2018) nog niet ontdekt. Warme plasma's omvatten zowel thermische als niet-thermische plasmacondities. Uitvoeringen zoals de 'gliding arc' ontlading hebben veel aandacht gekregen. Ze werken in niet-evenwichtsomstandigheden (max. temperatuur 1.500 K), waardoor veel hogere opbrengsten aan NO worden bereikt in vergelijking met thermische plasma's (ibid.). De 'gliding arc' kan ook worden toegepast voor de productie van vloeibare meststoffen (met vloeistoffen zoals water).

Ingels (2012a) heeft het patent met onderbouwing van de N2 Applied en GEA plasma unit die hier wordt geanalyseerd. In een octrooiaanvraag wordt gesproken over:

'[...] wherein the arc and plasma disc reactor comprises a heat exchanger, [...]'¹⁴.

Het bedrijf vond dit concurrentiegevoelige informatie waardoor we niet precies weten welk type plasma reactor is geïnstalleerd in de plasma units die in Nederland worden getest. In theorie kan het systeem werken met verschillende type reactoren:

'[...] an electric arc, electrostatic field, Nano pulsed electric field, dielectric barrier discharged, laser, radio- or micro-wave driven plasma generator, or any combination thereof, to produce a concentration of 0.1-12% by volume of NO_x in the air by direct nitrogen fixation' (Ingels, 2012a).

¹³ Zie ook [VILT vzw, Een luchtwasser en plasmareactor tegen de stikstofcrisis | Kennismakers](#) (geraadpleegd januari 2023).

¹⁴ [EP2704989A1 - Energy efficient process for producing nitrogen oxide - Google Patents](#) (geraadpleegd november 2023).

In recentere octrooien wordt gesproken over 'low pressure generating plasma reactor closed loop process and system' (Ingels, 2019a; 2019b).

2.4.2 Toepassing door GEA (ProManure E295 – Manure Enricher) en N2 Applied

De plasma unit van GEA en N2 Applied werkt met dunne fracties. N2 Applied stelt dat in het proces de uitgaande mest een pH tussen de 5 en 6 heeft (daarop wordt ook gestuurd¹⁵). En dat totaal-N in rundveedrijfmest daarbij van ca. 4 kg/ton¹⁶ naar ca. 7 kg/ton gaat, waarvan ca. 5 kg NH₄-N en nitriet (NO₂-N) en nitraat (NO₃-N). Deze komen normaal slechts in zeer kleine hoeveelheden voor in mest en het nitriet zou inhiberend kunnen werken op het microbioom in de geproduceerde NEO. Het nitriet is giftig voor planten, maar zal bij uitrijden onder aerobe omstandigheden snel omgezet worden in nitraat. Om die reden zou het gunstig kunnen zijn NEO bovengronds uit te rijden, naast een lager risico op N₂O-emissie en de vermeden schade aan de zode/bodem.

Dit plasmasysteem bestaat achtereenvolgens uit een compressor, de plasmagenerator, een gaskoeler en tenslotte een reactiekamer waar het gas in de mest gebracht wordt. Wanneer de ingestelde pH-waarde is bereikt, wordt een deel van de NEO uit de reactiekamer gepompt en wordt nieuwe dunne fractie in de reactiekamer gepompt.

Lucht-plasmatechnologie creëert dus reactieve stikstof die gemakkelijk kan worden omgezet in verdunde waterige salpeterzuuroplossingen. Als het wordt gemengd met rottend organisch afval of met opgeslagen mest, wordt het verlies van NH₃ sterk gereduceerd door het maken van niet-vluchtig ammoniumnitraat. Dit is een potent en gewaardeerde stikstofmeststof (Ingels & Graves, 2015; Graves et al., 2019).

Om het absorptieproces van stikstofoxiden te optimaliseren en om verstoppingen te voorkomen wordt met dunne fracties gewerkt. Dunne fracties van mest of digestaat moeten < 3 mm deeltjesgrootte en < 7% droge stof bevatten om verwerkt te kunnen worden (persoonlijke communicatie N2 Applied, december 2023).

In opdracht van N2 Applied zijn verschillende veldproeven en andere onderzoeken uitgevoerd. De resultaten van de veldproeven met de door plasma verrijkte dunne fractie (NEO) (Mousavi et al., 2022a; 2022b) wijzen gemiddeld op lagere ammoniakemissies en hogere opbrengsten dan met het onbehandelde materiaal. NEO benadert hierbij de werkingsgraad van kunstmest, als die gegeven wordt in gelijke hoeveelheden in termen van kg N/ha. Kijkend naar kwaliteitskenmerken van de gewassen en bodems werden in deze studies geen negatieve effecten gezien, anders dan een verzurend effect van zowel NEO als kunstmest. De algemene conclusie was dat, in een potexperiment en na twee jaar toepassing in veldproeven, NEO niet meer nadelige effecten had op de geselecteerde bodemorganismen en fauna dan de andere in het experiment gebruikte meststoffen (Mousavi et al., 2022a; 2022b).

In het programma Bemest op z'n Best¹⁷ worden in Nederland laboratoriumproeven rond (effecten van) de aanwending van NEO uitgevoerd. Resultaten hiervan zullen vermoedelijk in de eerste helft van 2025 gepubliceerd worden.

Pedersen et al. (2024) rapporteren dat met een gescheiden dunne fractie (ten opzichte van onbehandelde drijfmest) al een noemenswaardig ammoniakemissiereductie bereikt kan worden tijdens aanwending (55-74%) en dat deze reductie gelijk of hoger kan zijn als de dunne fractie wordt behandeld met plasma (NEO) (70-89%). In deze studie van Pedersen et al. (2024) werden de emissies van de eveneens geproduceerde dikke fractie echter niet in beschouwing genomen.

¹⁵ Voor de langdurige opslag van NEO adviseert het bedrijf een pH-waarde van 5 te gebruiken om te zorgen dat de pH van NEO gedurende de opslagperiode onder 6 blijft.

¹⁶ <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2018/01/Tabel-5-Forfaitaire-stikstof-en-fosfaatgehalten-in-dierlijke-mest-2018.pdf> (geraadpleegd februari 2024).

¹⁷ <https://www.wur.nl/nl/onderzoek-resultaten/onderzoeksinstituten/livestock-research/show-wlr/boeren-kunnen-stikstof-beter-benutten.htm>. Produce your own sustainable fertilizer | GEA ProManure E2950 (geraadpleegd januari 2025)

3 Methodologische aanpak

Binnen deze studie werden een aantal activiteiten uitgevoerd: een deskstudie waarin relevante literatuur werd gelezen en een aantal interviews werden uitgevoerd en het uitvoeren van een verkennende meting aan een plasma unit op een melkveebedrijf en mestanalyses. Op basis van alle informatie en de resultaten zijn twee scenario's modelmatig doorgerekend.

3.1 Deskstudie

In deze studie wordt gerapporteerd over de stand der kennis en technologieontwikkeling van plasmatechnologie voor het behandelen van mest. Daarbij wordt ook gekeken naar institutionele, bedrijfsmatige en andere aandachtspunten voor implementatie in het Nederlandse veehouderijdomein. Voor deze doeleinden werd een deskstudie uitgevoerd. Zowel de wetenschappelijke literatuur werd geraadpleegd als de zogenoemde 'grijze literatuur', zoals websites, notities, beleidsadviezen, etc. Gedurende de looptijd van de studie hebben we ook informatie van N2 Applied en GEA gekregen.

Om de wetenschappelijke literatuur te identificeren werd bijvoorbeeld in de Scopus database gezocht naar: 'plasma' AND 'manure' in de periode 2018-2023. Deze zoekopdracht leverde 109 hits op (februari 2023). Alle abstracts werden gelezen en de voor ons relevante publicaties werden gebruikt voor deze studie. Daarbij werd ook de zogenoemde 'snowballing' methode toegepast en verschillende betrokkenen en experts hebben ook relevante literatuur-tips gegeven.

Er werden verder een aantal semigestructureerde interviews met experts uitgevoerd. Daarin werd onder andere over de volgende thema's gesproken:

- Werkingsprincipes voor de reductie van met name methaan- en ammoniakemissies uit mest.
- Inventarisatie van mogelijke voor- en nadelige effecten (focus op stikstofoxiden en energiegebruik) en afwentelingen verderop in de keten.

Het uitgangspunt was plasmatechnologie in het veehouderijdomein en waar mogelijk werden specifieke vragen over het N2 Applied systeem gesteld. Maar er werd ook gevraagd naar mogelijk alternatieve uitvoeringen, principes en technieken. Andere aspecten waren bijvoorbeeld het implementatieperspectief op veehouderijbedrijven, technische inpasbaarheid, geschiktheid en voor welk type bedrijven, etc.

Hierbij de lijst van de expertises en instellingen van de geïnterviewde deskkundigen:

- (a) Hoogleraar in chemie en chemische engineering & (b) Postdoc chemische engineering en anorganische membranen en membraan reactoren - Eindhoven University of Technology (NL).
- (c) Chemische engineering en emissiemetingen bij aanwending – Aarhus University (DK).
- (d & e) R&D N2 Applied (NO).
- (f) Melkveehouder met ervaring met een N2 Applied plasma unit (UK).

3.2 Metingen aan het systeem

3.2.1 Bedrijfsbeschrijving

In december 2023 werd een aantal waarnemingen uitgevoerd op een melkveebedrijf waar recent een plasma unit is geïnstalleerd (André Hoeve in Spierdijk, Noord-Holland). Op dat moment had het bedrijf 310 melkkoeien met een jaarlijkse productie van ongeveer 10.000 kg melk per koe (persoonlijke communicatie melkveehouder, december 2023). Het bedrijf had een zogenaamde 'CONO Stal'¹⁸ en voerde een aantal nevenactiviteiten uit zoals zorgboerderij taken. Het bedrijf beschikt over 145 ha grasland en 6 ha werden verhuurd voor sierteelt.

De melkveestal was circa 74 meter lang en 38 meter breed. Er waren 6 rijen ligboxen en een centrale voergang – een 3+3 uitvoering. In de stal lag een emissiearme vloer, Den Boer Beton Sleufvloer plus, die een proefstatus¹⁹ had. Het was een dichte hellende vloer met geprofileerde rubber tegels die was voorzien van een mestschuif (zie foto hiernaast).

De mestkelder onder de dichte vloer had 3 mestkanalen die met elkaar waren verbonden – 6.000 m³ totaal capaciteit. In deze stal werd 23 à 24 m³ mest per dag geproduceerd. De mestkelder was 1,8-2,0 meter diep (persoonlijke communicatie melkveehouder, december 2023). Aan het einde/kop van de stal was een dwarsliggende mestkelder waarin de verse drijfmest werd verzameld. Drijfmest werd vanuit deze verzamelkelder naar een monovergister gepompt. Volgens de veehouder werd er 4 keer per dag ongeveer 6 m³ drijfmest per keer naar de vergister gepompt.

De monovergister (merk Bioelectric) had een capaciteit van 350 m³. Een WKK zette het biogas om in warmte en elektriciteit. Er werd 286.000 kilowattuur elektriciteit geproduceerd en 12 woningen in de buurt mee verwarmd (persoonlijke communicatie melkveehouder, december 2023).

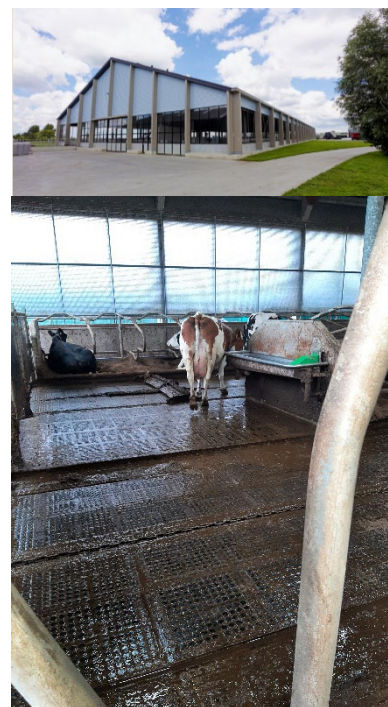


Foto 1 Vergister (Foto links), tijdelijke opslag dikke fractie met bovenop scheider (Foto midden) en impressie dikke fractie (Foto rechts).

Het digestaat werd verpompt naar een schroefpers. De dikke fractie viel in een tijdelijke opslag en twee keer per week werd dit (onbehandeld) in de ligboxen gestrooid als ligmateriaal. De dunne fractie werd verpompt naar de mestkelders onder de stal. In dit rapport zal voor de duidelijkheid hiernaar worden verwezen als dunne en dikke fractie van digestaat.

Zoals eerder gemeld, om verstoppingen bij de plasma unit te voorkomen en om een goede absorptie van de stikstofoxidede gassen te bewerkstelligen werd als eis gesteld dat de dunne fractie < 3 mm deeltjesgrootte en < 7% droge stof mocht bevatten.

¹⁸ CONO-stal - een duurzame stal - CONO Kaasmakers (geraadpleegd februari 2024).

¹⁹ De Den Boer Beton Sleufvloer plus is in de bijlage V van de Omgevingsregeling, voorheen Rav, verwerkt als volgt: HA 1.30 met een voorlopige emissiefactor van 8,1 kg NH₃/dierplaats/jaar. wetten.nl - Regeling - Omgevingsregeling - BWBR0045528 (overheid.nl) (geraadpleegd oktober 2024).

Het bereikte droge stofgehalte in de dunne fractie is sterk afhankelijk van de kwaliteit van de ingaande mest, maar een schroefpers met een hoog scheidingsrendement kan al aan deze eis voldoen.

De plasma unit was in een zeecontainer geïnstalleerd (zie foto hiernaast). Momenteel (2024) verwerkt deze plasma unit circa 3 m³ dunne fractie per dag. Idee is om naar 5 m³ per dag te gaan. Volgens de inschatting van N2 Applied kan een unit in theorie 3.000 à 4.000 m³ per jaar verwerken²⁰. In de pilots in de UK wordt nu al inderdaad tussen 5 à 10 m³ per dag behandeld (persoonlijke communicatie melkveehouder, september 2023).



Het melkveebedrijf was voorzien van de vereiste 400V/3 fasen capaciteit. De plasmabehandeling gebruikte rond de 100 kWh per m³ dunne fractie van digestaat (persoonlijke communicatie N2 Applied, december 2023).

Momenteel leveren GEA en N2 Applied de basisinstructies en ondersteuning voor het beheer van de plasma unit.

Er zijn geen chemicaliën of ander materiaal nodig om de unit te bedienen behalve de eventuele toevoeging van anti-schuim. De mogelijkheid van toevoegen is standaard aanwezig en het systeem regelt dit automatisch, o.a. via detectie sensoren van schuim en druk in het systeem. Bij dit bedrijf wordt momenteel geen probleem met schuimvorming ondervonden.

Binnen de unit hangt een NO₂-detector en de technici van GEA en N2 Applied zijn ook uitgerust met een NO₂-detector.

Volgens deze bedrijven komt een groot deel (60%) van de door de plasma unit gebruikte elektriciteit als warmte vrij. Dus van elke 100 kWh die per m³ dunne fractie van digestaat nodig is, wordt 60 kWh (0,216 gigajoule) als warmte naar de buitenlucht afgevoerd via een droogkoeler²¹. Het idee was om op dit bedrijf deze warmte naar het warmtesysteem van de monovergister te gaan brengen.

De doelstelling van dit systeem is om de dunne fractie van het digestaat naar een pH van 5 te brengen (zie Hoofdstuk 2 voor uitleg van werkingsmechanismen).

Dit was een pilotbedrijf en er werd een klein volume dunne fractie behandeld. De geproduceerde NEO werd ten tijde van deze studie tijdelijk opgeslagen in een open container (zie foto hiernaast) die normaliter wordt gebruikt voor het uitrijden van mest. Vervolgens werd het in de mestkelder gebracht.



3.2.2 Concentratie-/emissiemetingen

Voor dit project werden naast NH₃ (natchemie door middel van wasflessen en impingers) tevens de broeikasgassen gemeten (gaschromatografisch na monsternamen met de longmethode). Met deze referentiemethoden wordt een gemiddelde over de gehele meetperiode van in dit geval ~ 3 uur vastgesteld. Deze metingen vonden plaats aan de uitlaat van de plasma unit, waarin monsternamelingen werden gebracht door middel van een lans (zie hieronder Foto 2 rechts). Tevens werd de ingaande lucht bemonsterd, ter hoogte van de luchtinlaat van de plasma unit. Alle bepalingen werden in duplo uitgevoerd.

Daarnaast is ook gescreend op de aanwezigheid van andere onwenselijke stoffen, met name NO en NO₂ met behulp van een FTIR (Fourier Transform InfraRed) monitor (DX4000; Gasmeter Technologies Oy, Vantaa Finland). Met deze multigas analyser werd tevens NH₃, N₂O, CH₄ en CO₂ continu gemeten, met een frequentie van iedere 20 seconden.

²⁰ [Kunstmestvervanger maken met veel stroom - YouTube](#) (geraadpleegd januari 2024).

²¹ [Kunstmestvervanger maken met veel stroom - YouTube](#) (geraadpleegd januari 2024).



Foto 2 FTIR monitor met interface-laptop (Foto links) wasflessen (100 ml 0,05 M salpeterzuur) met de impingers erin, waarmee de NH_3 wordt opgevangen. Ter controle wordt er een tweede fles in serie geplaatst. Gesloten vaten (longmethode broeikasgassen) met 40 liter Nalophan monsternamezakken voor luchtbemonstering, monsternameleiding (teflon of polyethyleen) en kritische openingen (borosilicaatglas, binnendiameter: 8 mm; lengte: 80 mm), ondergebracht in een roestvrijstalen container voor bescherming. Lucht wordt met behulp van een pomp in de zakken in het vat gezogen (Foto midden) en uitlaat op de plasma unit met de lans voor concentratiemetingen (Foto rechts).

3.2.3 Mestmonsters – reguliere mestanalyses

De volgende monsters werden genomen (zie tevens Paragraaf 3.2.1):

1. Drijfmest - vanuit de verzamelkelder aan de kop van de stal.
2. Digestaat - komend vanuit de vergister voor de scheiding.
3. Dikke fractie digestaat vers - handgrepen vanuit de opslag.
4. Dikke fractie digestaat ouder – handgrepen genomen uit de ligboxen.
5. Dunne fractie digestaat vers - genomen uit de mixput bij de melkveestal waar deze wordt teruggebracht na scheiding.
6. Dunne fractie digestaat ouder – genomen uit de mestkelder bij het aanzuigpunt van de plasma unit.
7. NEO – uit de mestcontainer die als tijdelijke opslag fungeerde.

Voor de monstername werd een Eijkelkamp 'multisampler' gebruikt²² - behalve voor de dikke fracties. De diameter van de transparante monsterbuis was 30 mm. Met de monsternamebuis werd zoveel mogelijk de gehele mestkolom bemonsterd. Hierbij werden meerdere steken genomen, om voldoende materiaal te verzamelen. De steken werden in een emmer bijeengebracht, geroerd/geschud waarna de temperatuur gemeten werd ten behoeve van de AMP-bepaling (zie Paragraaf 3.2.4). Hiertoe werd een thermosfles gevuld, naast een kunststof monsternamepotje voor de reguliere mestanalyse.

De monsters werden gekoeld bewaard bij 4 °C en geanalyseerd op totaal-N, $\text{NH}_4\text{-N}$, P, K, ds (droge stof) en as (anorganische stof; standaard mestanalyse – zie Bijlage 1). Tevens werd daarbij de pH bepaald, in dit geval werd voor de monsters dunne fractie digestaat ouder en NEO aanvullend $\text{NO}_2\text{-N}$ en $\text{NO}_3\text{-N}$ in het analysepakket opgenomen²³. De resultaten worden in Paragraaf 4.3 gepresenteerd.

3.2.4 Mestmonsters – Actuele Methaan Productie (AMP)

De Actuele Methaan Productie (AMP) werd bepaald van vijf van de zeven monsters, omdat het lab waar de AMP-analyses worden uitgevoerd tijdens dit onderzoek beperkt ruimte had. Besloten is het monster digestaat niet te analyseren. Immers dit is een tussenproduct dat verder niet opgeslagen werd, maar direct gescheiden (monsters dikke fractie digestaat en dunne fractie digestaat vers). Tevens werd het monster boxstrooisel (dikke fractie digestaat ouder) niet geanalyseerd, omdat verwacht mag worden dat de methaanemissie uit vers materiaal hoger ligt.

²² [Vloeistoflagenmonsternemer - stangbediend, standaard | Royal Eijkelkamp](#) (geraadpleegd februari 2024).

²³ Monsters werden eerst met teststrookjes gescreend op de aanwezigheid van nitriet en nitraat. Als gevolg hiervan werd voor totaal-N bij de monsters dikke fractie digestaat ouder en NEO de Kjeldahl-methode (destructie) toegepast, waar de NO_3 wordt gebonden met salicylzuur en natriumthiosulfaat, [403311 \(wur.nl\)](#). Gehalten $\text{NO}_2\text{-N}$ en $\text{NO}_3\text{-N}$ in dunne fractie digestaat ouder en NEO werden ionchromatografisch bepaald.

Analyses werden dus gedaan met:

1. Drijfmest.
2. Dikke fractie digestaat vers.
3. Dunne fractie digestaat vers.
4. Dunne fractie digestaat ouder.
5. NEO.

AMP betreft de hoeveelheid methaan die wordt geproduceerd door afbraak van organische stof in de opgeslagen mest op het moment van bemonstering (bij vergelijkbare in-situ temperatuur en zonder toegevoegd inoculum)²⁴. Voor het bepalen van AMP moet de temperatuur tijdens monsternamen zo veel mogelijk behouden blijven. De monsters zijn op 12 december 2023 verzameld en binnen enkele uren in thermoskannen bij het laboratorium van LeAF afgeleverd met daarbij de precieze gewenste testtemperatuur. LeAF streeft ernaar om het verschil tussen de gewenste en werkelijke temperatuur niet meer dan 1-2 °C bedraagt.

De AMP-bepaling werd uitgevoerd volgens het protocol dat WLR binnen het EU-project M4Models heeft ontwikkeld. Monsters worden voorafgaand aan de test niet gezeefd, tenzij er grove stukken in de mest aanwezig zijn (bijvoorbeeld stro of ander stalmateriaal) en zeven nodig blijkt om een representatief monster in te wegen. Alleen in dat geval zal de mest over een grove zeef worden gehaald. De droge stof en anorganische stofgehalten worden dan van zowel het oorspronkelijke monster als van het gezeefde materiaal bepaald. De test wordt ingezet met 4 replicaties, de eindmeting vindt plaats op dag 7. De CH₄ bepaling is uitgevoerd door het Servicelaboratorium van WLR. Het protocol is bijgevoegd in Bijlage 2, waarbij ook is aangegeven hoe de testopzet bij LeAF is geweest.

VFA, pH en EC

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

Hoofdstuk 4 beschrijft de resultaten van de uitgevoerde metingen en mestanalyses.

3.3 Scenario berekening

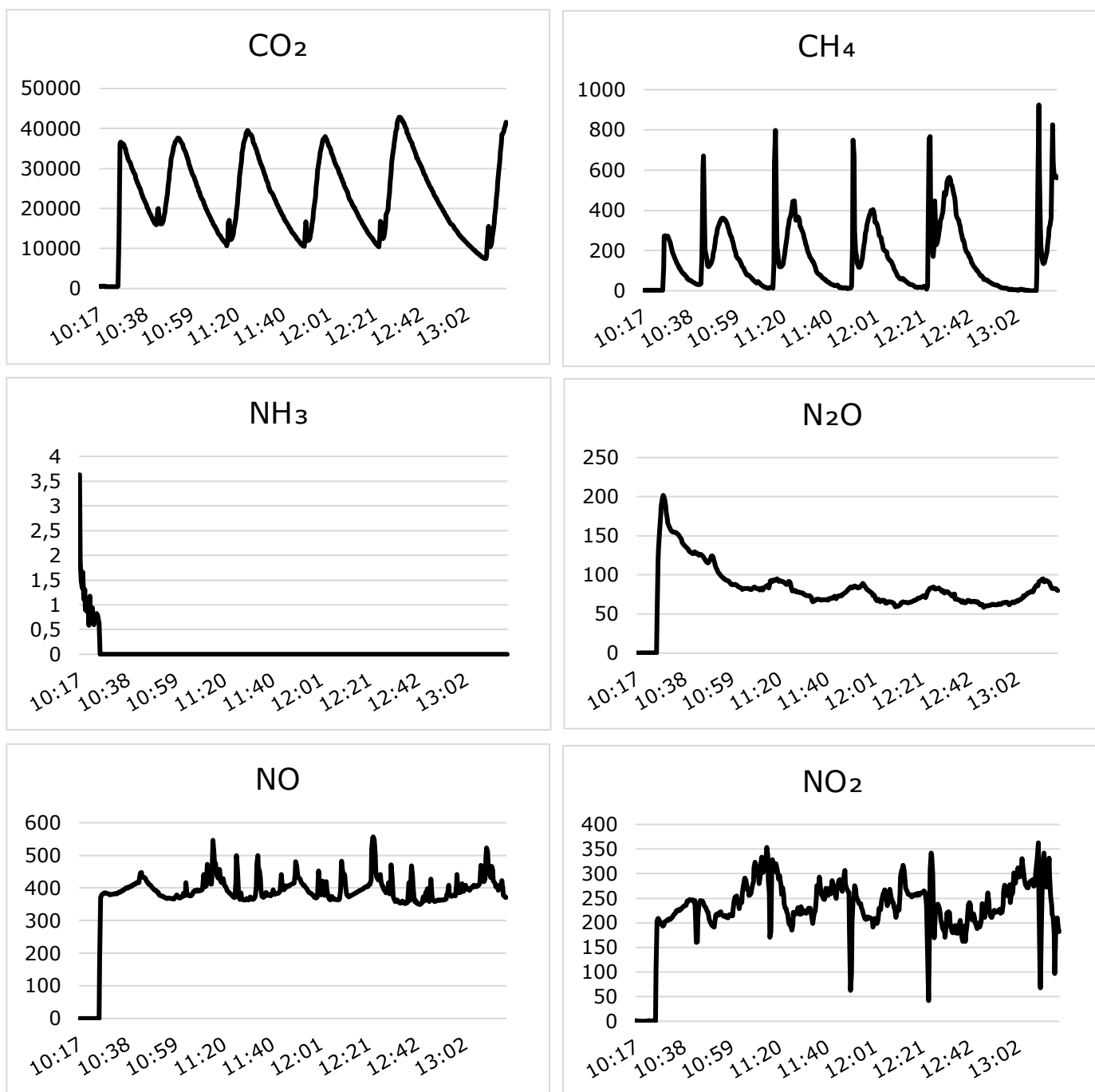
Er werden modelberekeningen uitgevoerd voor twee scenario's/bedrijven: (1) Een gemiddeld en (2) een groter Nederlands melkveebedrijf. Hiervoor is het model van Gollenbeek et al. (2022) als basis gebruikt, waarmee in de gehele mestketen (van uitscheiding onder de staart tot de aanwending van de mestproducten op de grond), berekend kan worden welke emissies (van ammoniak, methaan, lachgas en kooldioxide) in de verschillende stappen (uitscheiding, stal, opslag, mestbewerking en aanwending) vrijkomen, wat de massabalansen van elke stap zijn (van organische stof, stikstof en fosfaat) en wat de kosten zijn in deze mestbewerkingketen. In Hoofdstuk 6 worden de twee scenario's uitgewerkt en de uitgangpunten (zie ook Bijlage 3) en resultaten van de modelberekening gepresenteerd.

²⁴ AMP geeft meer informatie dan de bekende 'Biochemical Methane Potential' (BMP) analyses. BMP betreft de hoeveelheid methaan die potentieel uit de organische stof in de opgeslagen mest, op het monstertijdstip, kan worden gevormd. Met het oog op mestvergisting feitelijk de maximaal te verwachten biogasopbrengst.

4 Resultaten metingen en monsteranalyses

4.1 Resultaten concentratiemetingen aan de uitlaat van de plasma unit

Er werd ongeveer drie uur lang (van 10:27 tot 13:20u) continu gemeten aan de uitlaat van de plasma unit op het bedrijf in Spierdijk (zie Paragraaf 3.2). Figuur 3 geeft een grafisch beeld van de concentraties in ppm gemeten met de FTIR.



Figuur 3 Concentraties kooldioxide (CO₂), methaan (CH₄), ammoniak (NH₃), lachgas (N₂O), stikstofmonoxide (NO) en stikstofdioxide (NO₂) gemeten met de FTIR aan de uitlaat van de plasma unit, in ppm.

N2 Applied meldt (persoonlijke communicatie, november 2024) dat de plasma unit een uur voor de start van de WLR-metingen is gestart. Hierdoor kunnen er in het eerste uur afwijkende resultaten worden waargenomen. De resultaten van dit eerste uur worden weergegeven in Figuur 3, maar zijn weggelaten uit de concentratie- en emissieberekeningen (Tabel 1 en Tabel 2).

De meetleiding werd pas in de uitlaat van de plasma unit gebracht, nadat de FTIR op bedrijfstemperatuur gekomen was en begonnen was met meten. De eerste paar minuten van de grafieken in Figuur 3 zijn daardoor dus metingen aan de omgevingslucht. Ze zijn hier weergegeven, omdat het laat zien dat NH₃ volledig gereduceerd lijkt te worden, van een achtergrondniveau naar nul. De andere N-verbindingen (NO, NO₂ en N₂O) stijgen echter naar hoge waarden.

Na drie uur te hebben gemeten werd de stroom onderbroken vanwege werkzaamheden bij de monovergistinginstallatie. Er werd besloten om de meting niet meer op te starten omdat er voldoende data was verzameld om een eerste indruk van het systeem te kunnen geven.

Tabel 1 geeft een cijfermatige samenvatting van de resultaten van deze metingen. Met de monitor werden de concentraties gemeten. Om iets over de werkelijke emissie te kunnen zeggen is het noodzakelijk ook het debiet te weten. N2 Applied vond dit concurrentiegevoelige informatie waardoor we niet precies weten hoeveel lucht in het systeem wordt ingebracht en dus ook via de uitlaat er uitgaat. In de volgende paragraaf wordt een ruwe schatting gemaakt van de emissies op basis van een range die in de patenten is vermeld.

Tabel 1 Cijfermatige samenvatting van de gemeten concentraties aan de uitlaat van de plasma unit, in ppm en mg/Nm³ bij 20 °C en 1013 mbar.

	Referentiemethode*	Gemiddelden FTIR	
	ppm	ppm	mg/Nm ³
CO ₂	21.826	22.671	41.478
CH ₄	177	175	116
NH ₃	Afg.	0	0
N ₂ O	95,5	74,1	136
NO	-	399	497
NO ₂	-	241	461

* Als referentiemethode werden de longmethode (voor CO₂, CH₄ en N₂O) en natchemie (impingers; voor NH₃) toegepast. De laatste bleek voor deze toepassing ongeschikt en resultaat werd daarom afgekeurd, voor NO en NO₂ is op het WLR-Servicelab geen referentiemethode beschikbaar.

Visueel is een duidelijk patroon zichtbaar voor CO₂ en CH₄, vermoedelijk verband houdend met de cycli van de plasma unit (behandeling van batches eens dat de dunne fractie van digestaat de ingestelde pH-waarde heeft bereikt).

Ondanks het vergistingsproces en daarna vrij lange opslagtijd, vindt nog enige methaanemissie plaats. In digestaat vanuit een vergister blijft de methaanproductie geruime tijd doorgaan. In de praktijk wordt daarom vaak een na-opslag gerealiseerd waar het methaangas ook nog van wordt opgevangen. In het patroon zien we steeds bij het begin van de batch een hoge methaanconcentratie. Door het in beweging brengen van het digestaat ontwijkt de op dat moment nog aanwezige CH₄. Als de pH gaat dalen, wordt ook de methaanproductie geremd en nadert de 0-lijn.

De concentratie kooldioxide is erg hoog. Uit de literatuur is bekend dat deze bij het aanzuren van mest uit anorganische C en calciumcarbonaat gevormd wordt (Schott et al., 2023).

Bij N₂O, NO en NO₂ bestaat er een tegengesteld en minder uitgesproken patroon. Dit is mogelijk een overmaat aan stikstofoxiden, die gaandeweg het proces in omvang toeneemt.

Ammoniak wordt dus volledig gereduceerd maar er zijn wel concentraties stikstofoxiden en lachgas gemeten.

4.1.1 Van concentraties naar inschatting van emissies

Het bepalen van de concentratie van een gas is niet voldoende om iets over de emissie te kunnen zeggen. Voor het bepalen van emissies moet ook de hoeveelheid lucht (ventilatiegraad of debiet) die door het te meten object heen gaat bekend zijn. Dit kan zijn een stal of zoals hier de uitlaat van de plasma unit. Dus, emissie = concentratie * ventilatie.

Om een inschatting van de emissies die via de uitlaat naar de lucht worden geëmitteerd te maken is gebruik gemaakt van de openbaar beschikbare informatie uit de patenten van dit systeem (Ingels, 2012a, 2012b, 2019a, 2019b). Tabel 2 geeft een indicatie van de berekende emissies op basis van de concentraties die zijn gemeten en de debietrange die vermeld is in de patenten van Ingels, die aan de basis van het N2 Applied systeem liggen. Deze wordt gegeven als 10-50 Nm³/kg NO₃-N, dus onder normaalcondities 10 tot 50 m³ lucht per kg stikstof vastgelegd in de vorm van nitraat. In Noord-Amerika gelden 0 °C en 1013 mbar als normaalcondities, in Europa zijn dit 20 °C en 1013 mbar. Hiervoor is in de berekening gecorrigeerd door het toepassen van de ideale gaswet (vermenigvuldiging met factor 293/273).

Tabel 2 Berekende emissies uit concentratieresultaten – bij normaalcondities van 20 °C en 1013 mbar, voor de range in debiet vermeld in het patent van 10,7 tot 53,7 Nm³/kg NO₃-N en nitraatgehalte gevonden in de NEO.

Emissie (kg/m ³ dunne fractie van digestaat)		
	min. (bij 10,7 Nm ³ /kg NO ₃ -N)	max. (bij 53,6 Nm ³ /kg NO ₃ -N)
CO ₂	1,2	6,1
CH ₄	0,003	0,017
NH ₃	0	0
N ₂ O	0,004	0,020
NO	0,015	0,073
NO ₂	0,014	0,068
CO ₂ -eq*	1,1	5,7
NO _x	0,028	0,141

* Hierin is de CO₂ zelf niet meegerekend, omdat CO₂-emissies van natuurlijke processen als een onderdeel van de zogeheten korte kringloop worden gezien. Verder staan 1 kg N₂O en CH₄ gelijk aan respectievelijk 265 en 28 kg CO₂.

In principe zijn de emissies van de broeikasgassen CH₄ en N₂O niet echt hoog te noemen als we ze in perspectief plaatsen. Deze komen dus uit de uitlaat van de plasma unit en komen uit het ingaande materiaal of ontstaan in het behandelingsproces. Dit proces kan als gevolg hebben dat de dunne fractie van het digestaat stabiel wordt (< pH 6), zie de volgende paragrafen over de analyse van mestmonsters. Echter om een CO₂-neutrale veehouderij te kunnen bereiken kunnen deze hoeveelheden BKG ook een issue worden. Ter indicatie, in 2017 stootte de gemiddelde nieuw verkochte personenauto 109 g CO₂/km uit²⁵ waardoor het behandelen van een m³ dunne fractie van digestaat overeenkomt met een rit van tussen de 11 en 53 km.

Verder is de NO_x-emissie uit landbouw een niet vaak voorkomend onderwerp, behalve als het over glastuinbouw (warmtekrachtkoppelingen) of mobiele werktuigen gaat. Ter indicatie, de gemeten concentraties en ingeschatte stikstofoxidenemissies per m³ dunne fractie van digestaat staan gelijk aan 114 tot 571 km in een gemiddelde auto (0,24631 g/km voor 2017, Geilenkirchen et al., 2024). Er zijn systemen beschikbaar die kunnen voorkomen dat deze emissies de buitenlucht bereiken.

Binnen de scope van dit onderzoek kon geen vergelijking met onbehandelde dunne fractie van digestaat gemaakt worden. Voor een zuiver vergelijk zou namelijk een proefopzet nodig zijn geweest waarbij het materiaal dezelfde handelingen ondergaat, uitgezonderd toevoeging van plasma gegenereerde radicalen.

²⁵ <https://www.clo.nl/indicatoren/nl013415-co2-emissie-per-voertuigkilometer-van-nieuwe-personenautos-1998-2017> (geraadpleegd mei 2024)

4.1.2 Discussie - Concentraties in perspectief

In de arbeidsomstandighedenregeling, bijlage XIII²⁶, zijn voor een aantal gassen voor de mens maximale aanvaarde concentraties vastgelegd bij een blootstellingduur (tijd-gewogen gemiddelde, afgekort TGG) tot 8 uur per dag en een temperatuur van 20 °C en een luchtdruk van 1013 mbar. Voor enkele gassen is tevens een grenswaarde vastgesteld voor een kortdurende blootstelling van ten hoogste 15 minuten.

Tabel 3 Wettelijke grenswaarden* voor blootstelling van mensen aan concentraties van mestgassen volgens bijlage XIII van de arbeidsomstandighedenregeling bij een tijd-gewogen gemiddelde (TGG) duur van 8 uur, respectievelijk 15 minuten (tussen haakjes) (Puente-Rodríguez et al., 2025).

Gas	TGG 8 uur (15 min) ²⁷		Symptomen
	mg/m ³	ppm	
Ammoniak (NH ₃)	14 (36)	20 (50)	Ademnood, tranende ogen, keelpijn, hoesten, moeilijke ademhaling. Sterk irriterend aan ogen en slijmvliezen (De Sutter, 2014).
Methaan (CH ₄)	Niet vermeld.		Ademnood, hoofdpijn, sufheid, bewusteloosheid door zuurstofgebrek (De Sutter, 2014).
Kooldioxide (CO ₂)**	9.000	5.000	Hartkloppingen, ademnood, duizeligheid, hoofdpijn, misselijkheid, braken, zwaktegevoel, bewusteloosheid door zuurstofgebrek (De Sutter, 2014).
Lachgas (N ₂ O)	180	50	Effecten van kortdurende blootstelling. De vloeistof kan bevrozing veroorzaken. De stof kan effecten hebben op het centrale zenuwstelsel. Dit kan resulteren in een verlaging van het bewustzijn. <u>ICSC 0067 - NITROUS OXIDE (ilo.org)</u> (geraadpleegd mei 2024).
Stikstofmonoxide (NO)	2,5 (niet vermeld)	2 (niet vermeld)	
Stikstofdioxide (NO ₂)	0,96 (1,91)	0,5 (1)	Zie RIVM-website over effecten van stikstofdioxide op de gezondheid van mensen <u>Luchtkwaliteit - stikstofdioxide RIVM</u> (geraadpleegd april 2024).

* De grenswaarde voor een gevaarlijke stof geldt in beginsel alleen voor blootstelling aan de stof in zuivere vorm en is niet zonder meer van toepassing indien de stof een bestanddeel is van een mengsel van stoffen, waaraan blootstelling plaatsvindt of kan plaatsvinden. Mogelijk dat bij een gecombineerde blootstelling het gezondheidskundige gevolg van de afzonderlijke stoffen aanzienlijk wordt versterkt of verminderd.

** 5.000 ppm is gebaseerd op toxische waarden. CO₂ wordt echter gezien als indicator voor voldoende/gezonde ventilatie. Zo adviseert de GGD een bovengrens van 950 ppm voor openbare ruimten waar groepen mensen samenkomen.

De in dit onderzoek gemeten gassen komen via de uitlaat in de buitenlucht terecht. Hoewel in de buitenlucht een zekere verdunning plaatsvindt geeft Tabel 3 een overzicht van grenswaarden van een aantal van deze gassen voor mensen. Uit Tabel 1 en Tabel 3 blijkt dat de gemeten concentraties van CO₂ en stikstofoxiden problematisch kunnen zijn. Op basis van deze inzichten is het advies om te voorkomen dat uitgaande lucht zich ophoopt in besloten ruimtes en om aanvullende en systematischer emissiemetingen aan (de uitlaat van) de plasma unit uit te voeren. Er zijn ook commercieel efficiënte filters beschikbaar, om de uitstoot van stikstofoxiden te verminderen/neutraliseren.

Methaan kan een explosief mengsel vormen in combinatie met de omgevingslucht, wanneer de concentratie methaan tussen 5 en 15 volume-% ligt. De gemeten concentraties liggen ver beneden deze grens.

²⁶ <https://wetten.overheid.nl/BWBR0008587/2023-07-01/#BijlageXIII> (geraadpleegd december 2023).

²⁷ <https://wetten.overheid.nl/BWBR0008587/2023-07-01/#BijlageXIII> (geraadpleegd december 2023).

4.2 Resultaten AMP-analyses

Tabel 4 geeft de resultaten van de actuele methaanproducties weer, analyseresultaten voor de vluchtige vetzuren zijn weggelaten omdat deze weinig informatief zijn aangezien naast de dunne fracties geen analyse mogelijk was voor het vaste materiaal van de dikke fractie van digestaat.

Tabel 4 Resultaten Actuele Methaan Productie (AMP) analyse.

	OS (g/kg)	Testduur (u)	Testduur (d)	CH ₄ -productie (g CH ₄ /kg OS/d)	CH ₄ in buis eind (ppm)
Drijfmest	84	164	6,82	0,10 ± 0,02	12170 ± 1535
Dikke fractie digestaat	375	166	6,93	0,01 ± 0,00	4579 ± 448
Dunne fractie digestaat vers	66	168	6,99	0,06 ± 0,01	5890 ± 934
Dunne fractie digestaat ouder	20	165	6,89	0,07 ± 0,01	2444 ± 418
NEO	28	163	6,79	0,00 ± 0,00	64 ± 26

Het materiaal dat de plasma unit bereikte (namelijk dunne fractie van digestaat ouder) bevatte weinig organische stof. Naderhand werd door de veehouder een waterlekage in de kelder geconstateerd, wat tot verdunning van de dunne fractie van digestaat geleid heeft (zie Paragraaf 4.3). Daarnaast was de drijfmest dus al vergist en trad tijdens opslag vóór de behandeling in de plasma unit mogelijk nog CH₄-emissie op. De verblijftijd in de mestkelder was lang omdat de dunne fractie van digestaat aan de ene kant van de stal werd ingebracht en aan de andere kant uitgepompt. Hierdoor moest een groot deel van het mestcircuit in de 6.000 m³ grote kelder worden doorlopen. Per kg OS was echter een vergelijkbare CH₄-productie mogelijk bij verse en oudere dunne fractie van digestaat. In de NEO lag de productie vele malen lager (nadert zelfs tot 0), wat gezien bijvoorbeeld de pH (zie Paragraaf 4.3) ook te verwachten is. Eerdere behandeling van de dunne fractie van digestaat zou uiteraard tot overall betere resultaten kunnen leiden.

4.3 Resultaten mestanalyses

De verkregen mestmonsters werden onderworpen aan een standaard mestanalyse, met toevoeging van NO₂-N en NO₃-N voor dunne fractie digestaat ouder en voor NEO (respectievelijk het ingaande en uitgaande materiaal van de plasma unit). Vanwege de mogelijke aanwezigheid van deze stoffen werden de monsters hierop eerst gescreend met teststrookjes. Op basis van de uitkomsten werd voor de totaal-N in de monsters NEO en dikke fractie digestaat ouder gebruik gemaakt van een alternatieve analysemethode. Om die reden hebben deze resultaten een indicatief karakter, zie Paragraaf 3.2.3 en Tabel 5.

Tabel 5 Resultaten mestanalyses uitgevoerd door het WLR-Servicelaboratorium.

	N-tot (g/kg)	P (g/kg)	K (g/kg)	NH ₄ -N (g/kg)	DS (g/kg)	As (g/kg)	pH	NO ₂ -N (g/l)*	NO ₃ -N (g/l)*
Drijfmest	4,92	0,93	5,25	2,10	111,2	24,5	7,7		
Digestaat	2,75	0,60	3,17	1,56	41,3	15,2	7,6		
Dikke fractie digestaat	8,67	2,45	4,66	2,48	427,8	60,4	8,9		
Dunne fractie digestaat vers	4,77	0,90	5,53	2,53	86,6	24,2	7,7		
Dunne fractie digestaat ouder	2,68	0,48	3,51	1,63	38,9	14,7	7,7	0,001	0,009
NEO	5,23*	0,51	3,55	1,51	47,0	14,2	4,5	0,061	2,74
Dikke fractie digestaat ouder	13,55*	4,16	9,66	0,40	582,2	99,3	8,3		

* Indicatief resultaat vanwege alternatieve analysemethode, benodigd vanwege de hoge NO₂-N en NO₃-N gehalten. Met deze methode worden deze warden meegenomen in de bepaling van totaal-N.

De analyses laten zien dat de pH bij het NEO-product inderdaad voldoende verlaagd is (pH < 5,5) zodat nauwelijks emissies van ammoniak- en methaanemissies uit deze fractie/product zijn te verwachten.

Verder wijzen deze resultaten erop dat de gehalten van de geproduceerde mest niet stabiel zijn en/of dat verdunning plaatsvindt. Zo heeft het digestaat lagere P- en as-gehalten dan de ingaande drijfmest. Bij een normaal vergistingsproces mag worden verwacht dat het ds% met ca. 10% afneemt vanwege het ontwikkende methaan. Deze analyses laten een afname in ds zien van meer dan 50% (111,2 naar 41,3 g/kg). Dit wijst erop dat er direct na de vergisting of in de vergister een verdunning heeft plaatsgevonden. In de technische ruimte was een monsternamepunt voor digestaat aanwezig, mogelijk bevatte de dode ruimte hiervan nog een restant water en/of ouder materiaal.

Na scheiding bevat de verse dunne fractie van digestaat namelijk weer vergelijkbare gehalten als de drijfmest. Echter ook de oudere dunne fractie van digestaat die uiteindelijk de plasma unit bereikt, bevat een duidelijk lager P-gehalte. Later werd inderdaad waterlekage in de kelder geconstateerd, naar inschatting van de veehouder betrof het 15 tot 16 m³ per dag (persoonlijke communicatie, augustus 2024). Ten opzichte van de dagelijkse productie aan dunne fractie van digestaat van ca. 20 m³ (23,5 m³ digestaat x 10 tot 20% scheidingsrendement schroefpers) bijna een factor twee. De analysecijfers zijn daarmee wel verklaarbaar, maar niet meer representatief voor een goed oordeel over het proces.

In de NEO werd in vergelijking met dunne fractie van digestaat ouder geen hoger NH₄-N gehalte gevonden. Door de lange opslagduur kan veel vrij ammoniak zijn geëmitteerd, waardoor geen verschuiving richting ammonium meer plaatsvond. Wel verdubbelde het totaal-N gehalte door de vorming van met name nitraat, meer dan verwacht. Bedacht moet worden dat de plasmatechniek hier door het optreden van de lekkage op zeer dun digestaat toegepast is. Of een vergelijkbaar resultaat (de vorming van nitraat) ook in deze mate opgetreden zou zijn bij dikker materiaal, zou nader onderzocht moeten worden. De zuurgraad van de NEO (pH van 4,5) werd verklaard door de leverancier vanwege een lagere pH instelling bij het opstarten van de plasma unit. Generatie van een overmaat aan stikstofoxiden zou de waargenomen NO_x emissie (Paragraaf 4.1.1) kunnen verklaren. Dit laat zien dat de plasma unit daar beter op geregeld zou moeten worden en/of voorzien van een DeNO_x-installatie op de uitlaat. Voor de vermoedelijke aanwezigheid van NO₂- en/of NO₃-N in de dikke fractie digestaat ouder moet verklaring waarschijnlijk in nitrificatie van het materiaal (dat als boxstrooisel werd gebruikt) gezocht worden. Gezien de meststromen op het bedrijf is dit echter geen gevolg van het toepassen van een plasma unit.

5 Implementatie aspecten

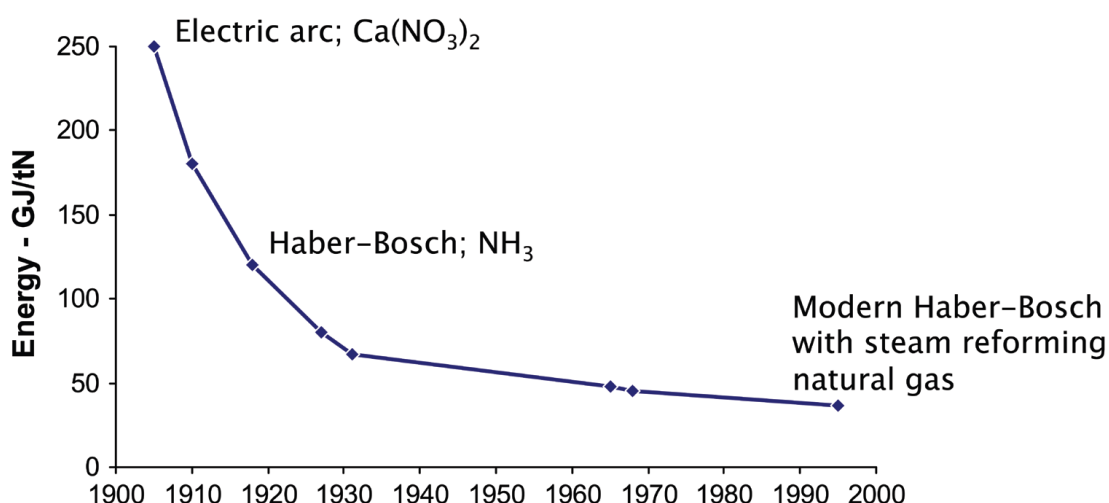
De plasma unit is in staat om stikstof in dunne fracties te fixeren en tegelijkertijd emissieprocessen in deze fracties te remmen. De commerciële levensvatbaarheid van plasmatechnologie in het veehouderijdomein hangt af van tal van andere factoren, zoals de energie-efficiëntie (elektriciteitsgebruik en daarbij horende kosten) en investeringskosten die gepaard gaan met de plasmatechnologie en -proces en de bijbehorende apparaten (mestpompen, -scheiders, etc.). Een andere belangrijke factor zijn de overheidsvoorschriften en beleid over definities van mest en kunstmest en mogelijk erkenning en borging van emissie-reducerende technieken. Maar ook praktische aspecten zoals de inpasbaarheid in bestaande stalsystemen, bijvoorbeeld met betrekking tot de capaciteit van de plasma unit in relatie tot de hoeveelheid geproduceerde mest, het opslaan hiervan en de emissies van verschillende mestfracties zijn belangrijk. Deze aspecten worden hieronder uitgewerkt.

5.1 Energievraag

5.1.1 Plasma versus Haber-Bosch

Het primaire doel van de huidige ontwikkelingen rondom plasmatechnologie in de landbouw is gerelateerd aan de productie van kunstmest. Momenteel wordt hiervoor het H-B proces gebruikt. Het H-B proces is in de loop der jaren steeds efficiënter geworden, zie *Figuur 4*. Een van de belangrijkste aspecten die bepalend gaan worden voor de implementeerbaarheid van plasmatechnologie is de energie-efficiëntie van het plasmaproces. En dit vooral in relatie tot het H-B proces. Een belangrijk criterium daarbij is de gebruikte energie per molecuul reactief stikstof (Nr - stikstofkunstmest).

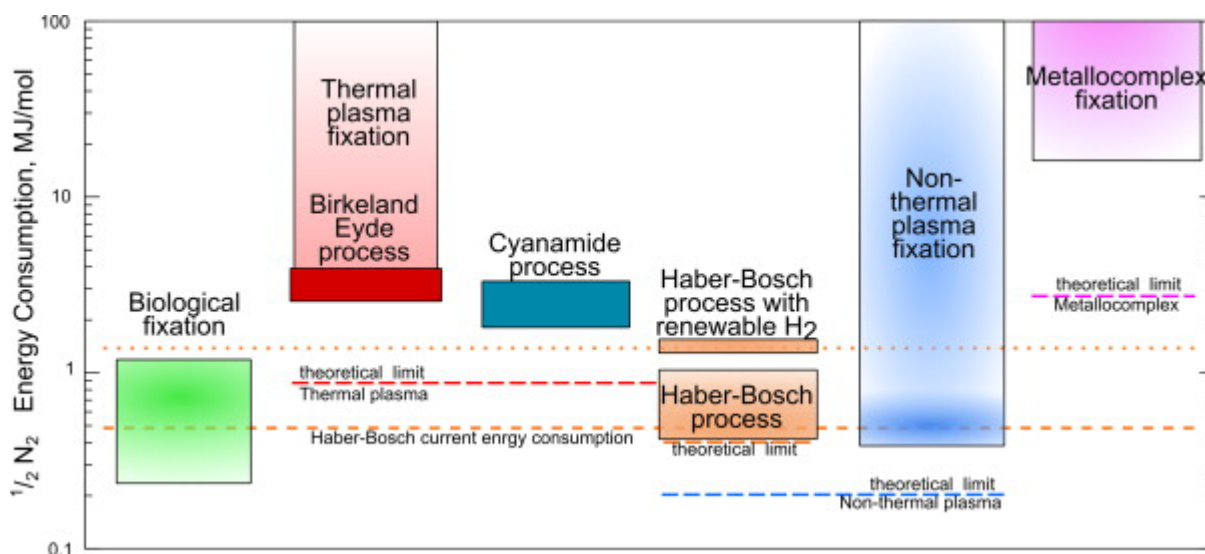
Moderne H-B-installaties kunnen wel minder dan 30 GJ/tN gebruiken (gigajoule verbruikt per metrische ton geproduceerde stikstof) (Graves et al., 2019). Dit ligt al dicht bij de minimale thermodynamische limiet van ongeveer 24 GJ/tN (Smil, 2002). Ingels and Graves (2015) melden dat sinds het Birkeland/Eyde-proces (een van de eerste industriële plasma achtige stikstoffixaties) met een prestatie van ~ 250 GJ/tN²⁸, de energie-efficiëntie van luchtplasma significant verbeterd is naar rond 100-150 GJ/tN. Graves et al. (2019) schatten in dat als de totale kosten van plasmaproductie van reactief stikstof lager zijn dan ongeveer € 2-3/kg N, het proces economisch levensvatbaar zal zijn. In Hoofdstuk 6 wordt een economische analyse voor twee type bedrijven uitgevoerd.



Figuur 4 Ontwikkeling van de efficiëntie van het energieverbruik voor stikstofbinding (Dawson & Hilton, 2011).

²⁸ Robinson en Stapelmann (2024) stellen dat erop gewezen moet worden dat het Birkeland/Eyde-proces op dit punt zwaar geïndustrialiseerd was. Het omvatte temperaturen van meer dan 3.000 °C, een plasmakamer van 3 meter breed, etc., veel intensiever dan welke experimentele reactor dan ook die momenteel in ontwikkeling is.

Figuur 5 laat de ontwikkeling zien rondom de energie-efficiëntie van stikstoffixatie. De ontwikkelingsruimte voor plasma is nog interessant te noemen. Vanuit het perspectief van Chercasov et al. (2015) hebben warme plasma's echter een theoretisch negatieve efficiëntiehorizon ten opzichte van het H-B proces. Echter terwijl het H-B proces afhankelijk is van aardgas (BKG-emissies) kan plasmatechnologie met hernieuwbare bronnen van energie werken.



Figuur 5 Vergelijking van het energieverbruik van stikstoffixatie. Het H-B proces heeft het laagste verbruik, maar bevindt zich nu dicht bij de theoretische limieten. Naast andere alternatieven vertoont alleen niet-thermische plasma-stikstoffixatie een hoge efficiëntie en heeft het een zeer lage theoretische limiet voor energieverbruik (Chercasov et al., 2015).

5.1.2 Plasma op praktijkbedrijven

Het bewerken van mest met de unit van GEA en N2 Applied vraagt momenteel ca. 100 kWh per m³ dunne fractie²⁹. Dit is uiteraard afhankelijk van het type (eigenschappen) mest/fractie en de buffercapaciteit om het wenselijke pH niveau te kunnen bereiken. Volgens deze bedrijven wordt er gewerkt aan het efficiënter maken van het proces, wat op laboratoriumschaal al is gelukt en de komende jaren opgeschaald kan worden. Maar op het moment van schrijven is er geen informatie beschikbaar over toekomstige energievraag en het verschil in energiegebruik tussen dunne fracties bijvoorbeeld van digestaat en drijfmest, of tussen verschillende mestsamenstellingen of verpompbaarheid - vanwege het soort dier, ras, of voerrantsoen.

Het melkveebedrijf in Spierdijk waar waarnemingen werden uitgevoerd had 310 melkkoeien die per dag 23 à 24 m³ drijfmest produceren. We gaan uit van een productie van 23,5 m³ per dag * 365 dagen = 8.577 m³ drijfmest per jaar. De inschatting van de melkveehouder was dat er na vergisting en het scheidingsproces met de schroefpers ongeveer 8.000 m³ aan dunne fractie van digestaat werd geproduceerd, grove inschatting is dat er dan 800.000 kWh nodig is. Hierbij is ervan uitgegaan dat het NEO-product een stabiele pH tijdens de winterperiode behoudt. Zou dit niet het geval zijn en moet de NEO opnieuw door de plasma unit worden behandeld, dan wordt de energievraag uiteraard hoger.

Een gemiddeld Nederlands melkveebedrijf met 110 melkkoeien (zonder monovergister) en met een gemiddelde mestproductie van 29 à 30 m³ drijfmest per koe per jaar zal een jaarlijkse mestproductie van (29,5 * 120=) 3.245 m³ drijfmest hebben. Als er ook een schroefpers wordt gebruikt voor het scheiden zijn dus ≈ 270.000 kWh zijn nodig om dit volume mest (dunne fractie) met de plasma unit te behandelen.

Voor het scheiden en verpompen van drijfmest en/of digestaat zijn tevens mestscheiders en -pompen nodig met verschillend vermogen en elektriciteitsconsumptie.

²⁹ [Kunstmestvervanger maken met veel stroom - YouTube](#) (geraadpleegd januari 2024).

Aan de ene kant wordt elektriciteit gevraagd om de dunne fractie te verrijken, maar aan de andere kant van de energiebalans van het plasmasysteem, komt er ook warmte vrij. Volgens N2 Applied wordt circa 60% van de elektrische input omgezet in warmte. Voor de implementatie op rundveehouderijbedrijven of in andere veehouderijsystemen kan deze warmte een wezenlijke input zijn. Er is over het algemeen niet veel warmtevraag in melkveestallen, wel bijvoorbeeld bij varkens of vleeskalveren. De warmtevraag voor de vergister kan al ruimschoots gedekt worden door de geproduceerde warmte van de WKK. Als (grotere) bedrijven groen gas zouden produceren, kan de warmte vanuit de plasma unit wel worden ingezet om de vergister te verwarmen, waardoor er geen biogas hiervoor meer nodig is. Ook kan deze warmte gebruikt worden voor het drogen van de dikke fractie van mest/digestaat of van gras. Idealiter zou het verwaard kunnen worden door het in een warmtenet te brengen en ook woningen of kantoren te verwarmen. Het bedrijf in Spierdijk is gunstig gelegen ten opzichte van andere bebouwing, en beschikt al over zo'n systeem.

Systemen zoals plasmatechnologie stellen wel eisen aan de capaciteit van de netaansluiting van het melkveebedrijf. Ook bij (deels) eigen opwek zullen er gedurende de dag of over het jaar perioden zijn waarbij de benodigde stroom van het net betrokken moet worden. Bij het implementeren van deze technologie in de praktijk zal verzwaring van de elektriciteitsaansluiting aan de orde zijn bij veel melkveebedrijven. Dit zal, in veel gevallen, niet op korte termijn kunnen worden gerealiseerd. Vanwege congestie zou de vereiste verzwaring van de netaansluiting om de nodige (400V/3 fase) capaciteit per unit te hebben, in veel gevallen moeilijk worden. Aan de andere kant en vanwege congestie zijn er momenten dat het niet rendabel/mogelijk is om elektriciteit aan het net te leveren. Op deze momenten worden systemen die veel elektriciteit gebruiken interessanter.

In de context van de energietransitie wordt momenteel in de veehouderij gewerkt aan het produceren van eigen energie. Zonnepanelen voor particulieren kunnen al een 400 Wattpiek bereiken. Ze halen deze maximale opbrengst echter nooit. Maar als er wordt uitgegaan van dat 1 zonnepaneel 300 kWh kan opleveren, betekent dit dat in Spierdijk er circa 2.667 zonnepanelen nodig zijn om de vereiste 800.000 kWh die de plasma unit nodig heeft om alle dunne fractie van digestaat te verwerken, te kunnen dekken. Voor een melkveebedrijf met 110 melkkoeien zouden ≈ 900 zonnepanelen voldoende kunnen zijn. Wel wordt in de zomer de meeste zonnestroom opgewekt waardoor voor jaarrond gebruik van eigen opwek voor de plasma installatie een overmaat aan zonnepanelen is vereist.

Het onderzoek en de ontwikkelingen rondom plasmatechnologieën evenals rondom het verrijken van organisch materiaal zoals mest, of water zijn in een versnelling gekomen. Experts verwachten dat een reductie van 50% in de energiebehoeften van plasmareactoren zeer waarschijnlijk haalbaar is op korte/middellange termijn (persoonlijke communicatie, juli 2023).

5.2 Kosten en baten

Hier worden een aantal kosten en baten uitgelicht, met name investerings- en jaarlijkse energiekosten. In Hoofdstuk 6 worden deze en andere schattingen gebruikt om twee scenariobedrijven te modelleren.

Investeringskosten

Een unit zoals die in Spierdijk is geïnstalleerd kost € 250.000 excl. BTW + 10.000 euro voor de installatie van de unit op locatie (persoonlijke communicatie N2 Applied, december 2023).

De units die momenteel in de Nederlandse pilots worden ingezet behandelen 3 tot 5 m³ dunne fractie per dag oftewel, in het beste geval, rond de 1.800 m³ per jaar als ze continu draaien (365 dagen). Bij een mestproductie per melkkoe van 29 tot 30 m³ per jaar bij volledig opstallen (Van Bruggen, 2022), is de capaciteit van de plasma unit met deze verwerkingsvermogens dan voldoende voor (de dunne fractie van) ongeveer 70 melkkoeien. Dus een bedrijf met 120 melkkoeien zou in principe 2 units nodig hebben, een bedrijf met 240 melkkoeien 4 units, etc. Dat wil zeggen, respectievelijk, 520.000 of 1.040.000 euro excl. BTW voor de investering.

De inschatting van N2 Applied is wel dat in de toekomst een unit tussen 3.000 à 4.000 m³ dunne fractie zal kunnen verwerken wat het aantal units per bedrijf kleiner zal maken (persoonlijke communicatie N2 Applied, december 2023). De capaciteit is uiteraard ook sterk afhankelijk van de mestsamenvatting. In de modelberekening (Hoofdstuk 6) wordt rekening gehouden met een verbetering van deze capaciteit, en daarmee lagere investeringskosten.

Jaarlijkse energiekosten

Zoals eerder vermeld wordt nu 100 kWh voor elke kubieke meter dunne fractie gebruikt. Een gemiddeld melkveebedrijf met 110 melkkoeien produceert circa 3.245 m³ drijfmest. Met een schroefpers wordt ongeveer 2.700 m³ dunne fractie geproduceerd. Er zijn dus ≈ 270.000 kWh nodig om dit volume dunne fractie met plasma te behandelen. Als we met een prijs van bijvoorbeeld 23 eurocent per kWh rekenen dan zouden de jaarlijkse kosten aan elektriciteit 62.100 euro bedragen. Het bedrijf in Spierdijk met 310 melkkoeien en 8.000 m³ dunne fractie van digestaat zou ($800.000 \text{ kWh} * 0,23 =$) 184.000 euro per jaar aan elektriciteit moeten betalen om deze dunne fractie door de plasma unit(s) te kunnen laten behandelen. Verder zullen er kosten worden gemaakt voor het scheiden en verpompen van drijfmest of/en digestaat. Energieprijzen fluctueren enorm. In de modelberekening (Hoofdstuk 6) wordt een goedkopere kWh-prijs gehanteerd, 0,18 €/kWh, deze prijs is door het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) voor 2030 voorspeld (Van Polen, 2020). Wanneer (deels) van zelfgeproduceerde energie gebruikt gemaakt wordt, zou hiervoor ook met de lagere kost- cq. opbrengstprijzen gerekend kunnen worden. Daar dit per situatie zal verschillen is hier geen rekening mee gehouden, echter dit zou de energiekosten enigszins drukken.

Warmte opbrengst

Van de kWh die de plasma unit gebruikt, wordt volgens N2 Applied ongeveer 60% in warmte omgezet. Van de theoretische 800.000 kWh die nodig zouden zijn in het melkveebedrijf in Spierdijk voor het behandelen van de dunne fractie van digestaat zou er theoretisch 480.000 kWh aan warmte worden geproduceerd. Dit is 1.728 gigajoule (GJ) warmte.

Arbeid en servicekosten

De extra handelingen vragen uiteraard arbeid, zeker als specifiek voor het proces de mest gescheiden moet worden. Als we uitgaan van 2 uur extra arbeid per week, betekent dat $2 \text{ uur} * 52 \text{ weken} * 50 \text{ euro/uur} =$ circa 5.200 euro extra kosten. Als we het minimumloon hanteren van 13,68 euro/uur³⁰ bedragen deze ingeschatte jaarlijkse kosten circa 1.400 euro.

De dikke fractie (na scheiding) kan gebruikt worden als boxstrooisel, wat kostenbesparend kan werken.

GEA-servicekosten voor een unit bedragen 15.000 euro per jaar.

Emissiereductie

De vermeden emissies laten zich moeilijk bepalen. De stikstof uit de dunne fracties die niet in de vorm van ammoniak verloren gaat, kan natuurlijk voor bemesting worden ingezet en kunstmest besparen. Ammoniakemissiereductie is momenteel verplicht voor het krijgen van nieuwe vergunningen maar wordt niet economisch beloond ('licence to operate').

Eén melkkoe produceert jaarlijks gemiddeld 37,6 kg CH₄ uit mest (Ruysenaars et al., 2022). Deze methaan kan bij een goed georganiseerd mestmanagementsysteem met 80-90% gereduceerd worden. Digestaat produceert nog steeds methaan (Baldé et al., 2022; VanderZaag & Baldé, 2022; Van Bruggen et al., 2023). Bij de berekening hiervan moet er rekening worden gehouden dat uit onderzoek is gebleken dat mestscheiding met een schroefpers op zichzelf al tot een substantiële methaanemissiereductie leidt (Zhang et al., 2022). Andere meer geavanceerde scheidingstechnieken kunnen de scheidingsefficiëntie verbeteren (VanderZaag & Baldé, 2022).

Momenteel worden reducties van broeikasgasemissies (ook) nog niet structureel beloond. Wel keren sommige melkverwerkende partijen premies uit voor milieuprestaties van hun toeleveranciers, of investeren zij in technologieën om op het boerenerf de emissies te beperken. Friesland Campina (FC) bijvoorbeeld is begonnen met het belonen van melkveehouders die hun CO₂ voetafdruk verkleinen.

³⁰ [Bedragen minimumloon 2024 | Minimumloon | Rijksoverheid.nl](#) (geraadpleegd mei 2024).

De voetafdruk per kg melk wordt met de Kringloopwijzer berekend. De drempelwaarde is 1.100 gram CO₂-eq per kg melk. Boven deze drempelwaarde wordt geen premie gegeven. Bij een footprint van 775 gram CO₂-eq per kg melk wordt de maximale toeslag van 1,50 euro per 100 kg melk uitbetaald. Bij deze beloningssystematiek maakt het niet uit met welke maatregelen de CO₂ voetprint wordt gereduceerd. De eerste stap (voor de leden van FC) om toegang tot deze toeslag te krijgen is om systematisch onderzoek uit te voeren naar de BKG-emissies van dit systeem en bij positieve resultaten deze in de Kringloopwijzer verwerken.

Een andere potentiële manier om baten te verkrijgen bij het verkleinen van de CO₂ voetafdruk is via het 'European Union Emissions Trading System' (EU ETS). De ETS CO₂-heffing legt een prijs vast voor de industriële emissie van een ton CO₂. Als dit systeem ook van toepassing zou worden gemaakt op landbouw³¹, voorziet het in verhandelbare emissierechten. De tarieven worden jaarlijks verhoogd. Vanaf 2024 is de jaarlijkse verhoging volgens de Nederlandse Emissieautoriteit vastgesteld op 12,69 euro (zie Tabel 6). Tegelijkertijd is er ook een handelssysteem met actuele marktprijzen³².

Tabel 6 Huidige tariefreeks tot en met 2030. Prijzen in euro per ton CO₂³³.

Jaar	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Tarief	30,48	41,75	55,94	74,17	86,86	99,55	112,24	124,93	137,62	150,31

Kunstmestproductie

Als het over de kosten en baten gaat is het goed om serieus te kijken naar de opbrengsten aan reactief stikstof bij het gebruik van plasma, dit is eigenlijk het einddoel van dit systeem. Het apparaat kan, volgens N2 Applied³⁴, daarbij ongeveer zeven tot tien ton N-kunstmest per jaar vervangen. De prijzen van kunstmest kunnen sterk fluctueren. In de modelberekening van twee scenario's worden deze en andere aannames gespecificeerd om de economische haalbaarheid van plasmatechnologie in de melkveehouderij in te schatten.

5.3 Inpasbaarheid in de melkveehouderij

In deze paragraaf worden een aantal praktische aspecten over de inpasbaarheid van plasmatechnologie in de melkveehouderij kort besproken.

Ruimte, mestmanagement en emissies

De plasma unit is gemonteerd in een zeecontainer en kan dus eenvoudig op een melkveebedrijf geplaatst worden, zonder grote ruimtevraag. Grote bedrijven zullen meer units nodig hebben. Vanwege het werken met verschillende fracties moet er wel rekening worden gehouden met (extra) buiten mestopslagen.

Zoals eerder vermeld kan drijfmest niet met de plasma unit van GEA en N2 Applied behandeld worden. Een scheidingsproces is nodig en dus is er een scheidingsinstallatie en zijn verschillende pompen nodig. Dit vereist dus enige ruimte. Er worden twee fracties geproduceerd die emissiearm opgeslagen moeten worden, of verwerkt. Mestopslagen buiten op het erf zijn vergunning plichtig.

De NEO wordt apart opgeslagen. In deze opslag dient een systeem aanwezig te zijn om de pH te monitoren. Volgens de gebruiksvorschriften van deze bedrijven wordt verwacht dat de pH stabiel zal blijven, als de NEO regelmatig in beweging wordt gehouden. In het slechtste scenario kan de NEO nogmaals behandeld worden in de plasma unit. In principe zijn weinig tot geen emissies te verwachten van deze behandelde dunne fractie (de NEO). De vraag hier is wat het buffervermogen van deze fractie is en dus hoelang het emissiearm/loos blijft. Het advies van deze bedrijven is om de pH-waarde van de opgeslagen NEO te monitoren, als de pH-waarde lijkt te stijgen, wordt de plasma unit op een lagere pH-doelwaarde ingesteld.

³¹ In Denemarken wordt een CO₂ belasting na 2030 geïmplementeerd [Landbouwakkoord in Denemarken: 15 procent van de landbouwgrond wordt bos](#) (geraadpleegd november 2024).

³² [Carbon Price Tracker | Ember \(ember-climate.org\)](#) (geraadpleegd december 2024).

³³ Bron: [Tarieven CO₂-heffing | Nederlandse Emissieautoriteit](#) (geraadpleegd oktober 2024).

³⁴ Zie bijvoorbeeld, [Kunstmestvervanger maken met veel stroom - YouTube](#) (geraadpleegd januari 2024).

Om aan de ammoniakemissie eisen te voldoen en zoveel mogelijk te reduceren, zal wel het mestmanagement geoptimaliseerd dienen te worden. Aangezien de vorming van ammoniak een snel verlopend proces is, moet de mest (urine + feces) zo snel mogelijk behandeld worden of emissiearm opgeslagen. Om het proces van mest uit de stal verwijderen/verplaatsing te versnellen is een emissiearme vloer voorzien van goede mestverwijderingstechnieken en regelmatig schuiven naar een korte tussenopslag vereist. Als er van een traditioneel melkveebedrijf wordt uitgegaan met een betonnen roostervloer en mestkelder voor het opslaan van mest met een dagelijks uitpompen van de drijfmest naar een mestscheider buiten de stal, dan zou de ammoniakemissie uit de stal, theoretisch met maar 25 à 40% gereduceerd kunnen worden. De aangenomen bijdrage van de roostervloer aan de totale ammoniakemissie uit de stal is 60 à 75% (Van Dooren et al., 2019). Omdat de mest uit de kelder niet volledig kan worden verwijderd (er is een zeker volume nodig voor het verpompen) zal de ammoniakemissiereductie in de stal minder dan 25-40% zijn.

Aanvullende maatregelen moeten genomen worden voor de dikke fractie. Momenteel worden de dikke fracties van drijfmest of van digestaat vaak gebruikt als beddingmateriaal voor de ligboxen. Het effect hiervan op de uiergezondheid is onbekend. Ook is de dikke fractie een bron van ammoniakemissie. Mogelijkheden om deze emissie te beperken zijn bijvoorbeeld de dikke fractie met een composteringstrommel gecontroleerd composteren/hygiëniseren, afvoeren naar een korrelaar, composteringbedrijf of direct transporteren naar akkerbouwbedrijven voor bemestingsdoeleinden.

Stroomvoorziening

De netaansluitingscapaciteit van veehouderijbedrijven kan ook een issue worden. De plasma unit gebruikt veel elektriciteit (100 kWh per 1 m³ dunne fractie) en stelt bepaalde eisen aan deze aansluiting (400V/3 fase, zie Paragraaf 5.1). Vanwege congestie zal de verzwaring van de netaansluiting voor veel bedrijven in het buitengebied een belemmering kunnen worden voor het implementeren van dit systeem.

5.4 Institutionele aspecten

De inpasbaarheid van plasmatechnologie in de Nederlandse veehouderij heeft ook te maken met de overheidsvoorschriften en beleid over definities van mest, kunstmest en vervangers (RENURE) hiervan. Of met de kringlooplandbouwtransitie die een toekomst zonder of met minder kunstmest ambiëert en met de energietransitie dat fossiele brandstoffen gaat afbouwen. In de volgende paragrafen wordt ingegaan op een aantal relevante aspecten die te maken hebben met de status van de door plasma verrijkte dunne fracties.

5.4.1 Inpasbaarheid binnen de (nationale) wet- en regelgeving

Kader

De Nitraatrichtlijn (91/676/EEC)³⁵ heeft tot doel de waterkwaliteit in Europa te beschermen door te voorkomen dat nitraten het grond- en oppervlaktewater verontreinigen. Daartoe wordt het gebruik van stikstofhoudende bemestingsproducten gereguleerd. De Nitraatrichtlijn geeft voor de uitvoering van deze bepaling een begripsomschrijving van dierlijke mest (artikel 2g): *excrementen van vee of een mengsel van strooisel en excrementen van vee, alsook producten daarvan*.

Landen mogen voor een deel zelf bepalen hoe ze de doelen van deze richtlijn willen behalen. De maatregelen die Nederland heeft genomen staan in de Meststoffenwet³⁶ (Msw). Hieronder vallen (Van Dijk et al., 2020):

- De Uitvoeringsregeling Meststoffenwet (Urm);
- Het Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet (Ubm);
- Het Besluit gebruik meststoffen (Bgm);
- De Uitvoeringsregeling gebruik meststoffen (Ugm).

De Nederlandse Meststoffenwet dient twee doelen. De Meststoffenwet reguleert enerzijds de vrije verhandeling van meststoffen.

³⁵ Richtlijn van de Raad inzake de bescherming van water tegen verontreiniging door nitraten uit agrarische bronnen, 91/676/EEG. [Richtlijn - 91/676 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](#). Geraadpleegd januari 2024.

³⁶ Meststoffenwet: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0004054/2020-02-20> (geraadpleegd januari 2024).

Het belangrijkste en tweede doel van de Meststoffenwet is de regulering van het mestoverschot. Bij regulering van het mestoverschot is het gebruik van dierlijke mest en producten daarvan afgestemd met bepalingen van de Wet Milieubeheer en in het bijzonder de daaronder ressorterende Wet Bodembescherming (Postma et al., 2020).

Normen

De regels die zijn gemaakt over mest gebruiken en uitrijden zijn de kern van het mestbeleid. Deze voorschriften zorgen ervoor dat er zo min mogelijk uit- en afspoeling is en dus dat stoffen uit mest het grond- en oppervlaktewater niet vervuilen. Sinds 2006 zijn er maximale hoeveelheden voor het gebruik van dierlijke mest, stikstof en fosfaat op landbouwgrond. Deze maximale hoeveelheden worden de gebruiksnormen genoemd. Er zijn er 3:

- Gebruiksnorm voor stikstof uit dierlijke mest.
- Gebruiksnorm voor stikstof uit alle mestsoorten.
- Gebruiksnorm voor fosfaat uit alle mestsoorten.

Voor het aanwenden van meststoffen zijn er twee stikstofgebruiksnormen, namelijk de totale stikstofgebruiksnorm (afhankelijk van grondsoort en gewas) en een norm voor stikstof uit dierlijke mest. Door de zogenoemde derogatie mag tijdelijk meer dierlijke mest worden aangewend dan de maximale Europese norm van 170 kg N per ha, namelijk 230 of 250 kg N/ha³⁷. Deze ontheffing wordt afgebouwd en vanaf 2026 geldt voor alle bedrijven dus de maximale norm van 170 kg N uit dierlijke mest per ha. Boven die 170 kg N mag met kunstmest worden bemest tot aan de onttrekkingsnorm van het gewas. Wanneer bepaalde meststoffen uit dierlijke mest worden beschouwd als kunstmestvervanger, kan het fossiele kunstmestgebruik worden verminderd. In de berekening van het toegestane gebruik aan stikstof tellen alle meststoffen mee, zowel organische als minerale meststoffen. Omdat niet alle stikstof uit organische meststoffen beschikbaar komt voor het gewas, wordt gerekend met een stikstofwerkingscoëfficiënt. De stikstofwerkingscoëfficiënt geeft de benutting van de stikstof uit een organische meststof als percentage ten opzichte van kunstmeststikstof.

Ondersteund door DLV Advies hebben N2 Applied en GEA een zienswijze op deze normen ingediend (inmiddels goedgekeurd door LNVN) met betrekking tot de verwerking van met plasma verrijkte dunne fracties (NEO) in de mestboekhouding. De wijziging is dat de stikstof die uit de lucht wordt toegevoegd (minerale N) als kunstmest wordt gezien en dus in de kunstmestruimte wordt geteld. Aan de andere kant wordt de organische stikstof en ammonium die al in de dunne fractie stond nog steeds gezien en geteld als dierlijke mest. De door plasma aan de dunne fractie toegevoegde N kan op die wijze worden gebruikt als kunstmest(vervanger).

In de zienswijze staat dat voor het bepalen van de stikstofwerkingscoëfficiënt van de NEO de stikstofbijdrage van de dunne fractie en het aandeel stikstof die uit de lucht is gehaald wordt gebruikt. Dit gebeurt naar rato van de respectievelijke werkingscoëfficiënten. De dunne fractie na scheiding heeft een werkingscoëfficiënt van 80%. De toegevoegde stikstof (N) heeft een werkingscoëfficiënt van 100%. Alleen de extra toegevoegde stikstof (N) door de verrijkingstap wordt toegerekend aan de kunstmestruimte. Voorbeeld: 1000 ton dunne fractie met 4000 kg N gaat door de plasma unit ('Manure Enricher') en komt eruit als 1001,2 ton (NEO) met 5200 kg N. Alleen de extra toegevoegde N (1200 kg) maakt gebruik van de werkingscoëfficiënt 100%, de rest heeft een werkingscoëfficiënt van 80% (4000 kg).

Administratief moet volgens deze zienswijze het zo verwerkt worden:

- Zorgvuldige administratieve registratie van de scheidingstap en de verrijkingstap is essentieel.
- De debietmeting en bemonstering van de verschillende fracties, evenals de monitoring van de verrijkingstap, dienen gedocumenteerd te worden.
- De werking van de verrijkingstap kan worden aangetoond door middel van bemonstering. De extra stikstof is aanwezig als nitraat, wat normaal niet in de dunne fractie wordt gevonden.

³⁷ In 2022 mochten bedrijven (met minimaal 80% grasland) nog 230 kg N/ha dierlijke mest plaatsen op de meeste zandgronden en 250 kg N/ha op andere type gronden. Vanaf 2023 wordt dit stapsgewijs verlaagd.

Andere belangrijke aspecten zijn dat het NEO-product uitsluitend emissiearm aangewend moet worden; en dat bij de aanwending van NEO nog steeds de gebruiksruimte N dierlijke mest beperkend is. Hierdoor kan het voorkomen dat de limiet voor dierlijke mest per ha is bereikt, terwijl de kunstmestruimte nog steeds niet volledig is benut. Het is ons niet bekend of het NEO-product als gehygiëniseerd product gezien kan worden en dus geschikt voor de export (hiervoor dient een validatie onderzoek plaats te vinden en zal de NVWA de mestverwerking moeten erkennen).

Hoe dan ook maakt deze zienswijze de implementatie van de plasmatechnologie voor het verrijken van mest en het maken van kunstmest interessanter.

5.4.2 RENURE

De wens van N2 Applied en GEA is om uiteindelijk de RENURE-meststofstatus voor het NEO-product te verkrijgen. RENURE staat voor 'REcovered Nitrogen from manURE' en het gaat om stikstofhoudende meststoffen die gewonnen worden uit dierlijke mest. De producten dienen een vergelijkbare werking te hebben qua benutting van stikstof als kunstmest en dienen geen verhoogd risico op nitraatuitspoeling te geven. Het gebruik van RENURE-producten vergt afstemming met de Wet Bodembescherming en het daaronder ressorterende Besluit gebruik meststoffen hetgeen pas uitvoering kan krijgen nadat RENURE-criteria geïmplementeerd zijn op Europees niveau in de Nitraatrichtlijn. In april 2024 deed de EU een voorstel om RENURE-meststoffen in Nederland toe te laten³⁸.

De voorgestelde criteria voor RENURE-producten zijn:

1. RENURE bemestingsproducten moeten tenminste (\geq) 90% minerale stikstof t.o.v. stikstof totaal bevatten OF de verhouding organische koolstof t.o.v. stikstof totaal moet kleiner of gelijk (\leq) zijn aan 3. Deze verhoudingen moeten gecorrigeerd worden voor elke toevoeging van chemische stikstof afkomstig van het Haber-Boschproces.
2. RENURE-bemestingsproducten mogen de volgende limieten aan zware metalen niet overschrijden:
 - a. Koper: 300 mg/kg droge stof
 - b. Kwik: 1 mg/kg droge stof
 - c. Zink: 800 mg/kg droge stof
3. Lidstaten moeten de nodige voorzieningen treffen om ervoor te zorgen dat het tijdstip van toediening en de gift van RENURE en andere materialen worden gesynchroniseerd met de NPK-behoefte van de gewassen om uit- en afspoeling van nutriënten te voorkomen en tot een minimum te beperken, bijvoorbeeld door het gebruik van vanggewassen, indien van toepassing.
4. Lidstaten moeten de nodige voorzieningen treffen om NH₃-emissies te voorkomen en te minimaliseren tijdens RENURE-toepassing op het veld:
 - a. Bemestingsproducten met minder dan ($<$) 40% nitraat t.o.v. totaal stikstof.
 - b. Voor producten met een bepaalde zuurgraad. Oorspronkelijk was het criterium pH-H₂O bodem > 5 . JRC zal onderzoeken of de pH van het product een betere beheersing van het risico op ammoniak vervluchtiging geeft.
5. Informatie over de samenstelling van N, P en K moet worden verstrekt om een juiste toepassing en gebruik van RENURE-materiaal te bevorderen.
6. Een aanvulling op het eerdere onderzoek is echter een limiet op bepaalde ziekteverwekkers. Zie schema over pathogenen in RENURE, uit de publicatie van de Europese Commissie.
7. Als aan alle voorwaarden voldaan wordt, dan mag 100 kg stikstof per hectare per jaar afkomstig van RENURE-producten worden toegepast.
8. RENURE-producten komen uit de volgende mesttechnieken: omgekeerde osmose, strippen/scrubben en struvietproductie.

Het toetsen van (met plasma geproduceerde) NEO aan deze criteria valt buiten het bestek van dit onderzoek. Echter, zoals eerder vermeld, als de plasma units worden geïnstalleerd en de zienswijze in werking treedt dan wordt het aandeel toegevoegde stikstof wel gerekend als kunstmest. De techniek is niet opgenomen in criterium 8.

³⁸ [Nitrates – updated rules on the use of certain fertilising materials from livestock manure \(RENURE\) \(europa.eu\)](#) (Geraadpleegd mei 2024).

5.4.3 Biologische landbouw

De biologische landbouw is een potentiële markt voor NEO. Bij de biologische landbouw is het gebruik van stikstofkunstmest niet toegestaan. De biologische sector gebruikt minder N dan de gangbare sector, echter geldt voor deze sector ook de (limiterende) Europese norm van 170 kg N/ha uit dierlijke mest³⁹. De sector gebruikt uiteraard dierlijke mest van biologische gecertificeerde dieren/bedrijven.

De vraag is of en in hoeverre de N2 Applied/GEA plasma unit binnen de biologische landbouw kan worden ingezet. Uit email-communicatie met de toezichthoudende organisatie op de biologische keten in Nederland (Skal Biocontrole) blijkt dat NEO niet gebruikt mag worden als meststof in de biologische landbouw o.a. omdat minerale stikstofmeststoffen niet worden gebruikt⁴⁰ in deze sector.

³⁹ [Regelgeving meststoffen \(skal.nl\)](#) (geraadpleegd januari 2024).

⁴⁰ Skal Biocontrole baseerde hun conclusie op Artikel 5g iii) van Verordening (EU) 2018/848 en bijlage II deel I onder 1.9.8 van diezelfde verordening. [CL2018R0848NL0000020.0001.3bi_cp 1..1 \(europa.eu\)](#) (geraadpleegd september 2023). In Bijlage II van Verordening 2021/1165 staat een opsomming van toegestane niet biologische meststoffen en bodemverbeteraars, NEO wordt hierin niet genoemd.

6 Scenario berekeningen

Hoewel er nog weinig informatie beschikbaar is over deze technologie, worden in dit rapport modelberekeningen uitgevoerd voor twee scenario's/bedrijven om een beeld te krijgen van de potentie van de technologie. In de studie van Gollenbeek et al. (2022) is een model opgesteld waarmee in de gehele mestketen (van uitscheiding onder de staart tot de aanwending van de mestproducten op de grond), berekend kan worden welke emissies (van ammoniak, methaan, lachgas en kooldioxide) in de verschillende stappen (uitscheiding, stal, opslag, mestbewerking en aanwending) vrijkomen, wat de massabalansen van elke stap zijn (van organische stof, stikstof en fosfaat) en wat de kosten zijn in deze mestbewerkingsketen.

6.1 Beschrijving van de scenariobedrijven

Om een vergelijkingskader voor plasmatechnologie te hebben, zijn met dit model scenario's berekend waarin deze technologie zou worden toegepast op 2 soorten bedrijven. In beide gevallen wordt de situatie met plasma units, *Scenariobedrijven*, vergeleken met *Referentiebedrijven* zonder plasma unit.

1. Het eerste scenario betreft een gemiddeld Nederlands melkveebedrijf met een mestkelder en traditionele roostervloer waar de plasmatechnologie wordt toegepast bij de dunne fractie van drijfmest na mestscheiding. In Paragraaf 6.1.1 worden de uitgangspunten van dit scenariobedrijf beschreven. Dit scenariobedrijf wordt dus vergeleken met een gemiddeld Nederlands melkveebedrijf zonder plasma unit en scheidingstap (referentiebedrijf).
2. Het tweede scenario betreft een groter bedrijf met 300 melkkoeien, een monovergister en waar de plasmatechnologie wordt toegepast op de dunne fractie van het digestaat na mestscheiding. In Paragraaf 6.1.2 worden de uitgangspunten van dit scenario beschreven. Dit scenario is geïnspireerd op het bedrijf in Spierdijk, zie Paragraaf 3.2.1. Voor dit bedrijfstype is gekozen, omdat daar reeds data van bekend zijn. Een andere reden is dat volgens ABN Amro⁴¹ vergisting in combinatie met het opwaarderen van biogas tot groen gas haalbaar is voor bedrijven met meer dan 300 koeien (voor bedrijven met meer dan 175 koeien is vergisting in combinatie met stroomopwekking ook acceptabel qua terugverdientijd). Het bedrijf in Spierdijk doet zelf geen jongvee-opfok, dit komt op grotere bedrijven vaker voor en is daarom hier overgenomen. Aan de andere kant worden in Spierdijk meer uren weidegang dan de minimum 720 uur dat hiervoor geldt toegepast, wat minder gangbaar is dus niet overgenomen. De referentie is dan hetzelfde melkveebedrijf maar zonder plasma unit.

In Tabel 7 staan de uitgangspunten voor de bedrijfsomvang van de beide referentiebedrijven en de plasma-scenario's. Zie ook in Bijlage 3 de uitgangspunten voor mestopslag en -aanwending in de scenario berekeningen.

Tabel 7 Omvang van de bedrijven voor de scenario berekening.

	Referentie- & Scenariobedrijf 1	Referentie- & Scenariobedrijf 2
Aantal melkkoeien	110	300
Pinken	31	0
Kalveren	32	0
Hoeveelheid grond (ha) totaal	60	100
Grassland (ha)	48	80
Maisland (ha)	12	20
Weidegang (uur/jaar)	720	720

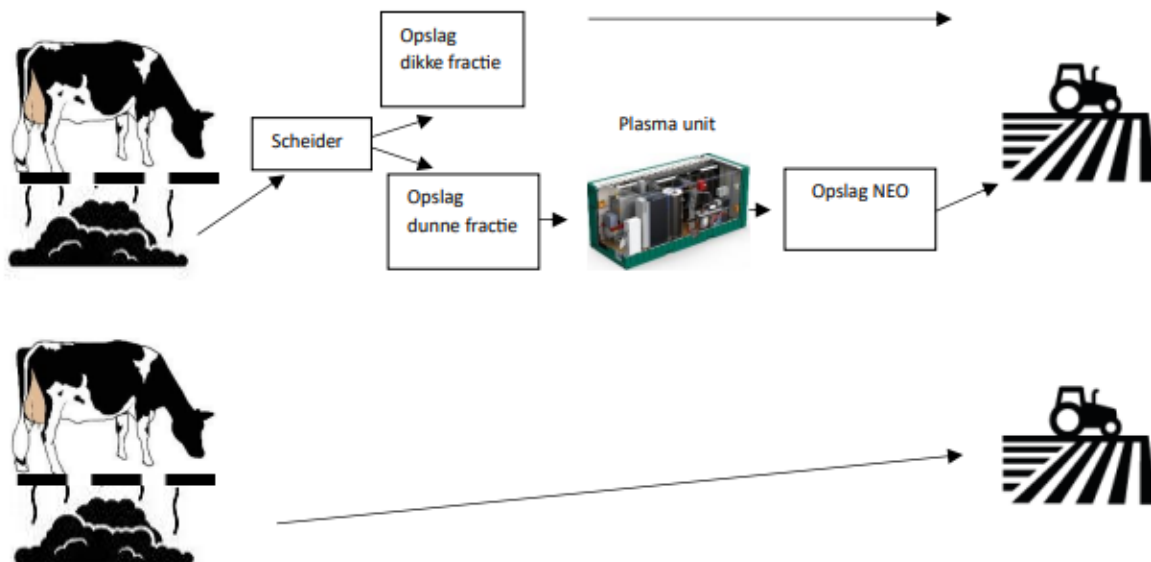
⁴¹ [hoe-mono-mestvergisting-nederland-helpt-vergroenen-december-2023_tcm16-216658.pdf](#) (geraadpleegd december 2024).

6.1.1 Scenario 1 - Het gemiddelde melkveebedrijf + plasma unit

De kenmerken van het Scenariobedrijf 1 en de uitgangspunten voor de modelberekening zijn als volgt:

- Traditionele stal met betonnen roostervloer en mestkelder.
- Mestproductie per melkkoe van 29 tot 30 m³ per jaar bij volledig opstallen (ingeschat op basis van BBPR model van WLR; Van Bruggen, 2022). Bij 720 uur beweiden komt 8% daarvan in de wei terecht.
- Een pomp brengt de drijfmest uit de mestkelder naar een schroefpers.
- Er is een vaste mestopslag voor de dikke fractie (overkapt maar zonder andere emissie reducerende maatregelen). Deze fractie blijft daar tot aan het groeiseizoen en wordt aangewend op het land.
- Na mestscheiding wordt de dunne fractie (kort) in een tussenopslag opgeslagen. Daarna wordt deze fractie behandeld met de plasma-unit.
- De NEO wordt in een aparte silo opgeslagen met voldoende capaciteit voor dit bedrijf.
- NEO wordt emissiearm op eigen grond (zoveel mogelijk) aangewend.
- Het melkveebedrijf heeft 60 hectare grond⁴².
- Het melkveebedrijf is niet verbonden met een warmtenet.

Referentiebedrijf 1 betreft een traditionele stal met een betonnen roostervloer en mestkelder. De drijfmest wordt op eigen grond aangewend.



Figuur 6 Scenariobedrijf 1 (boven) en Referentiebedrijf 1 (onder).

6.1.2 Scenario 2 – Een groot melkveebedrijf met vergister + plasma unit

De kenmerken van het Scenariobedrijf 2 en de uitgangspunten voor de modelberekening zijn als volgt:

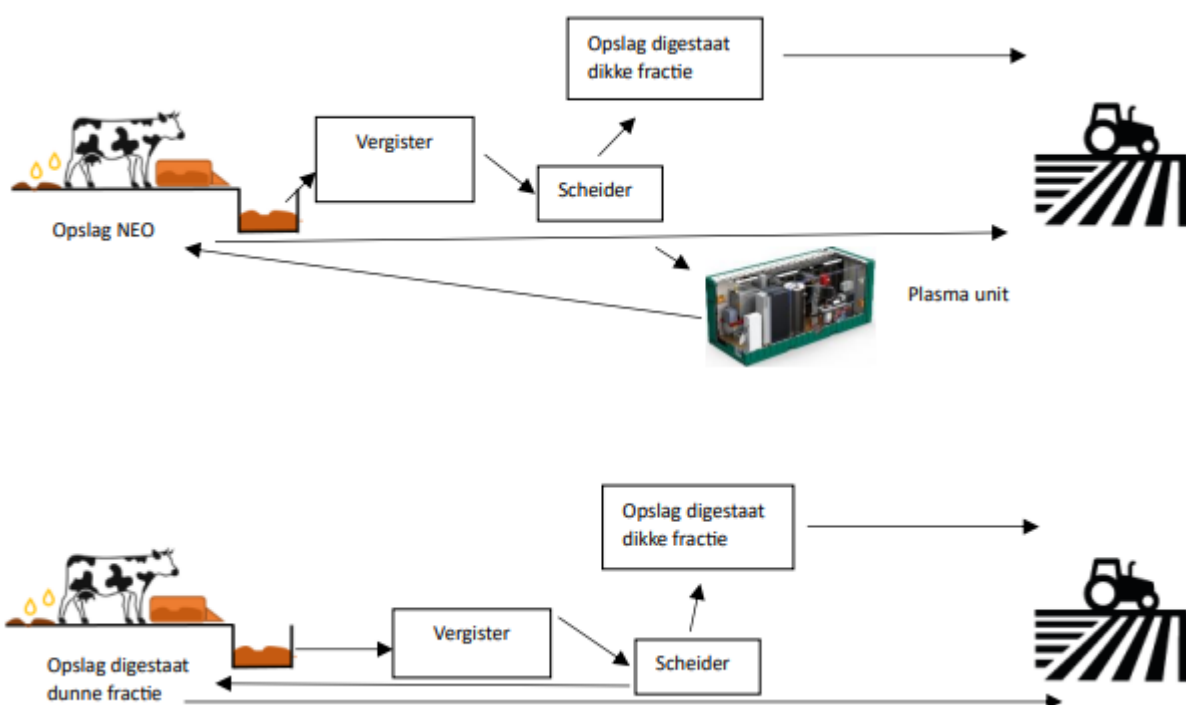
- Mestproductie per melkkoe van 29 tot 30 m³ per jaar bij volledig opstallen (Van Bruggen, 2022), bij 720 uur beweiden komt 8% daarvan in de wei terecht.
- Emissiearme vloer (bijv. Den Boer Beton Sleufvloer plus, met 38% ammoniakemissiereductie) voorzien van een mestschuif.
- Drijfmest wordt in een kleine tussenopslag/mestkelder aan het einde van de stal verzameld.
- Drijfmest wordt vanuit deze verzamelkelder 4 keer per dag (met ongeveer 6 m³ drijfmest per keer) naar de monovergister gepompt.
- De monovergister heeft een capaciteit van 800 m³. De verblijftijd in de vergister is tussen de 25 en 40 dagen⁴³. In het model wordt met 35 dagen gerekend.

⁴² [Rundveestapel nauwelijks gewijzigd | CBS](#) (geraadpleegd december 2024).

⁴³ Zie RVO Handreiking vergunningverlening monomestvergisting, [Monomest vergisting](#) (geraadpleegd november 2024).

Op het bedrijf in Spierdijk was de verblijftijd 's winters 14 dagen en 's zomers 21 dagen bij een capaciteit van 350 m³, maar dat kwam omdat het een opstartsituatie was. Bij de berekeningen is uitgegaan van de situatie zoals die in een stabiele situatie in de praktijk zou moeten gaan werken.

- Een WKK zet het biogas om in warmte en elektriciteit. Er wordt 300.000 kilowatt warmte geproduceerd.
- Het digestaat wordt gescheiden.
- De dikke fractie valt in een opslag en blijft daar tot aan het groeiseizoen om aangewend te worden op het land. Bij deze berekeningen gaan we ervan uit dat de dikke fractie niet wordt gebruikt in de ligboxen, zoals dat in Spierdijk wel gebeurde. Dat is gedaan om 2 redenen: (a) bij Scenariobedrijf 1 is dat ook niet gedaan, en (b) dikke fractie in de boxen geeft extra ammoniakemissie, wat de uitkomsten van de berekeningen zou kunnen vertroebelen.
- De dunne fractie van het digestaat komt in een korte tussenopslag terecht en vandaaruit behandeld met plasma en vervolgens verpompt naar een opslag onder de dichte vloer van de stal.
- De mestkelder heeft voldoende opslagcapaciteit voor de NEO.
- NEO wordt emissiearm op (zoveel mogelijk) eigen grond (100 ha) aangewend.
- Het melkveebedrijf is verbonden met een warmtenet.



Figuur 7 Scenariobedrijf 2 (boven) en Referentiebedrijf 2 (onder).

6.2 Uitgangspunten voor de plasma unit

De aannames bij de unit voor NEO-productie en daarbij geldende economische uitgangspunten zijn:

- Per dag kan deze unit momenteel 3-5 m³ dunne fractie verwerken (de intentie is om naar 10 m³ te komen, bron N2 Applied. Daarom is tevens een schaalfactor toegepast).
- De aankoop prijs voor de plasma unit van GEA-N2 Applied is € 250.000 excl. BTW. Daarbij komt 10.000 euro voor de installatie van de unit op locatie. Voor GEA-servicekosten wordt een jaarlijks bedrag van 15.000 euro in rekening gebracht per plasma unit (N2 Applied, persoonlijke communicatie, december 2023).
- De overige onderhoudskosten per jaar voor de mestopslag, pompen, leidingen etc. zijn berekend als 2,9% van betreffende investeringen (dus exclusief plasma unit).
- Er is gerekend met 2% inflatie per jaar.

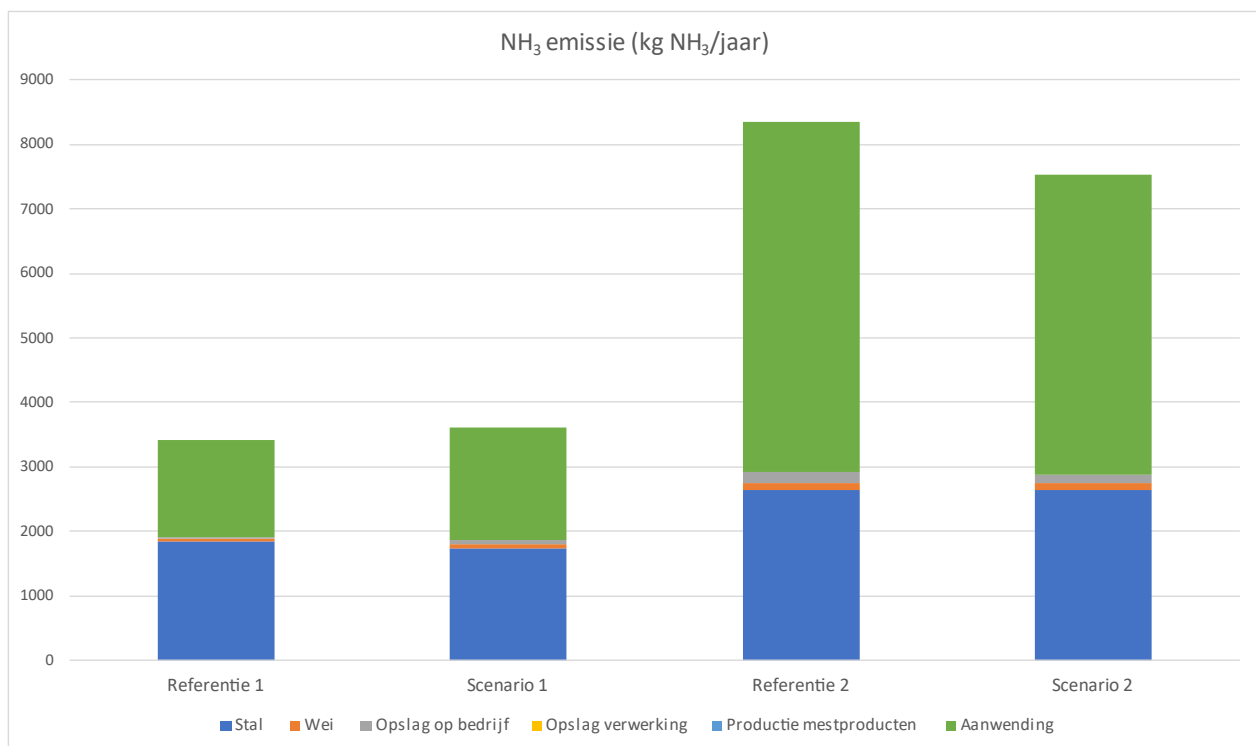
- Per unit is 2 uur extra arbeid per week op het bedrijf noodzakelijk.
- Er is 100 kWh per m³ dunne fractie (mest/digestaat) nodig (bron N2 Applied).
- 60% van de gebruikte elektriciteit komt als warmte vrij (bron N2 Applied), echter is 50% van de warmte benutbaar op de bedrijven.
- Van de warmte vanuit de WKK is 30% benutbaar.
- Met de 'verrijkingsstap' wordt de ammoniakale-N uit de dunne fractie van drijfmest en van digestaat met factor 1,3 verhoogd en ontstaat NEO (bron N2 Applied).
- Er is gerekend met een elektriciteitsprijs van 0,18 €/kWh. De prijs voor aardgas is 0,85 €/m³ (Van Polen, 2020).
- Rente investering 3% en afschrijving van de mestbehandeling in 10 jaar.

De overige uitgangspunten aangaande mestopslag, mestbewerking, mestaanwending, de prijzen bij mestafzet en de emissiefactoren bij aanwending van de mest zijn beschreven in Bijlage 3.

6.3 Resultaten modelberekening emissies

6.3.1 Berekende ammoniakemissies

In *Figuur 8* staat de ammoniakemissie in de mestketen (van uitscheiding tot en met de aanwending) voor de 4 beschreven bedrijven, uitgesplitst per bron van emissie. Steeds moet het 'Scenariobedrijf' vergeleken worden met de referentie. Het heeft niet zo veel zin om kleinere en grotere (complexere) bedrijven op basis van totale (bedrijfs-)emissies met elkaar te vergelijken.



Figuur 8 Berekende ammoniakemissie voor de referentie- en scenariobedrijven.

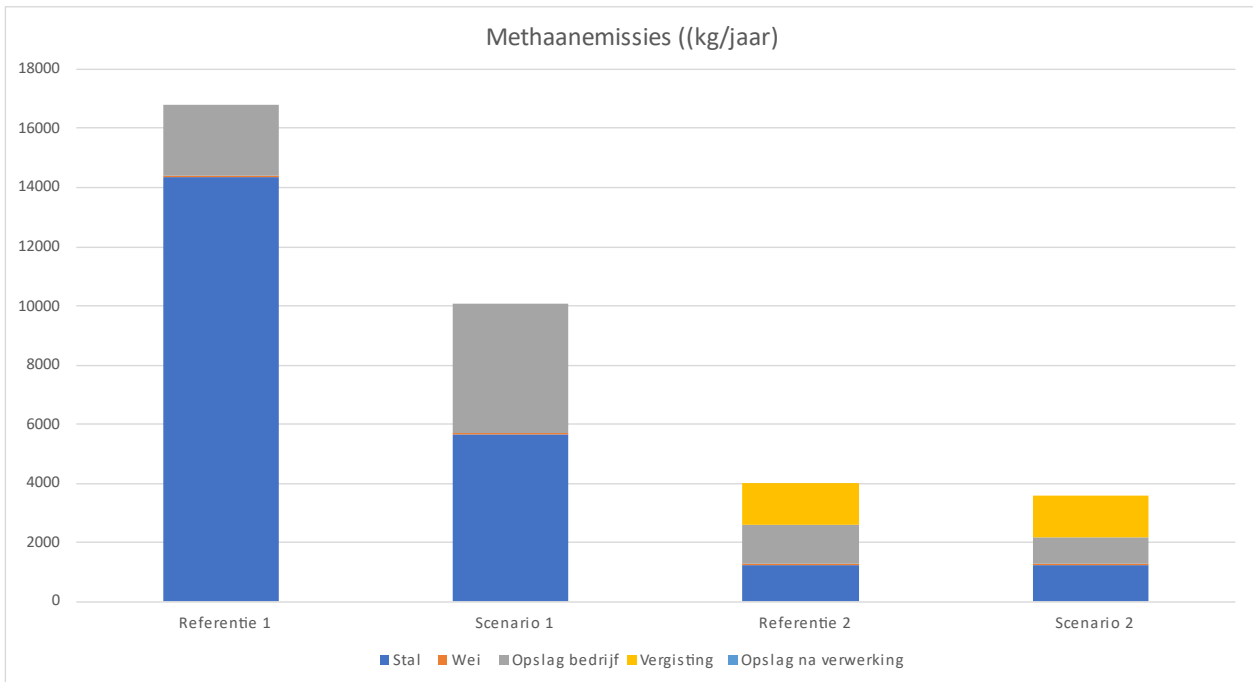
Bij het gemiddelde Nederlandse bedrijf (Scenario 1) wordt een beperkte reductie van de emissie uit de stal bewerkstelligd wanneer de mest sneller uit de stal wordt verwijderd als er een plasma unit wordt ingezet. De mest wordt korter in de stal opgeslagen en de kelderemissie wordt iets minder. De ammoniakemissie van de roostervloer (60-75% van de stalemissie) blijft gelijk. Bij de aanwending neemt de ammoniakemissie iets toe, vooral veroorzaakt door de stikstofverliezen bij de (minder emissiearme) aanwending van de dikke fractie. Per saldo wordt de ammoniakemissie bij het Scenariobedrijf 1 (met plasma unit) iets hoger (ca. 5%) ten opzichte van het Referentiebedrijf 1 (zonder plasma unit). Dit beeld zou kunnen wijzigen als de dikke fractie verder verwerkt wordt of als beddingmateriaal toegepast.

Hoewel aan deze processen ook emissies verbonden zijn, zullen deze lager zijn dan die bij aanwending. Daarnaast is de reductie bij aanwending van NEO wellicht hoger dan de nu gehanteerde 24% (aangezuurde mest met pH 6, Huijsmans et al., 2015).

Bij het grotere melkveebedrijf (Scenario 2) zorgen de dichte vloer met mestschuif en frequente afvoer van de mest uit de stal voor een lage ammoniakemissie uit de stal. Dit is zo voor de referentie- en scenariobedrijven – aannemende dat deze goed gebruikt wordt en dus werkt (zie kritische opmerkingen in Groenestein et al., 2023). Na vergisten en scheiden wordt de dunne fractie van digestaat gestabiliseerd door de plasmabehandeling, daardoor zal de emissie tijdens opslag van NEO laag zijn. In het model wordt voor de opslag van onbehandelde dunne fractie van digestaat uitgegaan van een stikstofverlies van 1%. Hierdoor is het effect hiervan op de totale ammoniakemissie in absolute zin beperkt. Tijdens het vergistingsproces wordt een deel van de N-organisch omgezet in ammoniak, hierdoor zou plasmabehandeling bij dunne fractie van digestaat tot een hogere reductie kunnen leiden dan dunne fractie van drijfmest. De ammoniakemissie bij aanwending van dikke fractie is voor Referentie 2 en Scenariobedrijf 2 gelijk (in tegenstelling tot Scenario 1 vindt bij beide scheiding plaats) en is in vergelijking tot aanwending van drijfmest of dunne fracties weer relatief hoog. De reductie van de ammoniakemissie bij aanwending bij de toepassing van de plasma unit komt voort uit de lagere emissies bij het aanwenden van de behandelde dunne fractie (deze is zuurder).

6.3.2 Berekende methaanemissies uit mest

Figuur 9 toont de methaanemissie voor de referentie- en scenariobedrijven. Dit betreft alleen de methaanemissie uit mest en niet de enterische methaanemissies.



Figuur 9 Berekende methaanemissie voor de referentie- en scenariobedrijven.

Er wordt een forse methaanemissiereductie (uit de mest) bereikt bij Scenario 1 als de plasmatechnologie wordt ingezet. Dit komt met name door de regelmatige afvoer van mest uit de stal naar de mestbehandeling. Kanttekening die hierbij gemaakt wordt, is dat de modelmatig berekende uitkomst van de snellere afvoer van mest uit de stal zoals het hier uitgevoerd zou worden niet in de praktijk is geverifieerd. Mogelijk is de reductie in de praktijk minder groot, omdat de put niet steeds geheel leegkomt en er een ent van actieve methaanvormers (inoculum) in de put aanwezig blijft. Er vindt wel enige verschuiving van de methaanemissie plaats van de stal naar de buitenopslag, maar netto is er een duidelijke reductie.

Bij Scenario 2 verandert nauwelijks iets in de stalemissie tussen het bedrijf met en zonder plasma unit. In dit scenario wordt zowel bij de referentiestal als de stal met de plasma unit een mestschuif toegepast en wordt de mest elke 6 uur uit de stal verwijderd (naar de vergister verpompt). Wel is een verbetering in de methaanemissie in de opslag zichtbaar in het staafdiagram. De extra methaanreductie op een dergelijk bedrijf met vergisten is ca. 10% bij het inzetten van de plasma unit.

Bij de opslag van het digestaat kan veel methaan ontwijken (afhankelijk van de wijze van opslag). In de modellering is uitgegaan van 35 dagen verblijftijd in vergister. In de praktijk worden bij monovergisting soms kortere verblijftijden gehanteerd, maar soms ook langere (tot ca. 50 dagen)⁴⁴. Niet altijd worden bij de opslag van digestaat luchtdichte voorzieningen toegepast. Dit kan leiden tot forse methaanemissies, die door het toepassen van plasma units tegengaan zouden kunnen worden.

6.3.3 Berekende totale broeikasgasemissies uit mest

Ten aanzien van de emissies van lachgas bestaan veel onzekerheden in de modellering, omdat het effect van plasmatechnologie op deze emissie uit mest nog niet bekend is en er ook een aandeel uit de luchtstikstof gebruikt in het proces zal zijn (zie Hoofdstuk 4). In deze paragraaf wordt daarom geen aparte grafiek gepresenteerd voor lachgas. Uit de modelberekening komt naar voren dat de emissie in CO₂-equivalent uit mest bij Scenario 1 verbetert ten aanzien van Referentie 1, omdat drijfmest wordt gescheiden en de dunne fractie behandeld met de plasma unit (er wordt minder methaan vanuit de mestkelder geëmitteerd, dit compenseert de verhoudingsgewijs hogere emissies bij de opslag van ca. 15% aan dikke fractie). Scenario 2 presteert slechter dan Referentie 2 door de emissies van N₂O tijdens de plasma behandeling (1% van de N-verrijking emitteert als N₂O – inschatting N₂ Applied). Omdat NEO een product met een lagere pH is, zou wel kunnen dat in de toekomst NEO bovengronds aangewend kan worden. Dit zou de kans op denitrificatie en N₂O emissie verkleinen en de prestatie over de hele mestketen gezien kunnen verbeteren.

6.4 Resultaten modelberekening economie

In Tabel 8 staan de benodigde investeringen, volgend uit de economische modelberekening, voor beide scenario's. De huidige plasma units kunnen maximaal (365 dagen x 5 m³ =) 1.825 m³ dunne fractie van drijfmest of digestaat per jaar behandelen (ca. totaal verrijking van 7.000 kg N). Dan zou het gemiddelde melkveebedrijf 2 plasma units nodig hebben en het grotere bedrijf 4 stuks. Als de leverancier echter ook units met andere capaciteit op de markt gaat brengen, kan die capaciteit (en dus de investering) beter afgestemd worden op het mestaanbod van het bedrijf (en de benodigde N verrijking uit mest). In de berekeningen is dat gesimuleerd door een schaalfactor in te voeren; dit is dus een inschatting wat de investering zou zijn bij een verbetering van de capaciteit van een plasma unit.

Tabel 8 Geschatte investeringen voor beide scenariobedrijven met een plasma unit.

	Scenariobedrijf 1		Scenariobedrijf 2	
Aantal plasma units	2	Schaalfactor	4	Schaalfactor
Stalaanpassingen	pm	pm	€ 118.373	€ 118.373
Vergister			€ 398.000	€ 398.000
Mestscheider	€ 34.000	€ 34.000	€ 34.000	€ 34.000
GEA-N ₂ Applied units*	€ 530.000	€ 319.000	€ 1.060.000	€ 639.000
Opslag NEO	€ 80.000	€ 80.000	--	--
Overige investeringen	€ 81.600	€ 81.600	€ 62.000	€ 62.000
Totaal investeringen	€ 725.600	€ 514.600	€ 1.672.373	€ 1.251.373

* Inclusief installatie en service gedurende het eerste jaar.

De totale investering voor het gemiddelde melkveebedrijf is dus geraamd op ca. 725.600 euro, als 2 standaard units met de huidige verwerkingscapaciteit nodig zijn. Indien plasma units met een hogere capaciteit gebouwd kunnen worden, kan de benodigde investering afnemen tot naar schatting ca. 514.600 euro.

⁴⁴ Er is ook een modelberekening uitgevoerd voor een opslagtijd van 50 dagen, maar de emissies zijn dan nauwelijks anders. De afbraak van de organische stof in de eerste 35 dagen is ruim 40% (volgens het gehanteerde model met hydrolyse constanten) en van 35 naar 50 dagen wordt nog maar 20% OS van de hoeveelheid van 35 dagen afgebroken.

De totale investering voor het grotere melkveebedrijf inclusief vergister is geraamd op 1.672.373 euro. Indien plasma-installaties met andere capaciteit beschikbaar komen, kan als gevolg van de schaalfactor de investering dalen naar circa 1.251.373 euro.

In Tabel 9 zijn de jaarkosten van de investering, de overige kosten en ook de opbrengsten in kaart gebracht, weer berekend met en zonder schaalfactor, uitgedrukt in euro's per koe om de beide bedrijven enigszins vergelijkbaar te maken.

Tabel 9 Geschatte kosten en opbrengsten voor beide voorbeeldbedrijven met een plasma unit, uitgedrukt in euro per melkkoe per jaar.

	Scenariobedrijf 1		Scenariobedrijf 2	
Aantal plasma units	2	Schaalfactor	4	Schaalfactor
Kosten				
Energie	462,84	462,84	498,74	498,74
Arbeid (extra)	28,36	28,36	30,67	30,67
Onderhoud en overige bedrijfskosten	449,63	313,26	365,11	265,11
Afschrijving en financiering	809,15	585,01	683,81	519,85
Totaal kosten	1.750	1.389	1.578	1.314
Opbrengsten				
SDE + levering			494,30	494,30
Warmte hergebruik plasma unit			18,37	18,37
Inzet teruggewonnen warmte	73,65	73,65		
Vermeden kunstmestkosten	71,37	71,37	64,93	64,93
Vermeden mestafzetkosten	36,00	36,00	13,09	13,09
Totaalopbrengsten	181	181	591	591
Opbrengsten minus kosten (mk/jaar)	-1.569	-1.208	-988	-724

Bij deze tabel zijn de volgende opmerkingen te maken:

- Het hoge stroomverbruik leidt bij het in het model gebruikte stroomtarief van 18 euro/MWh tot kosten voor N verrijking van 5,5 euro/kg N bij Scenariobedrijf 1 en 5,7 euro/kg N bij Scenariobedrijf 2. In dit geval is het op dit moment aantrekkelijker om kunstmest aan te kopen (gekozen uitgangspunt 1 €/kg N⁴⁵). Als kunstmest, in het kader van milieuproblematiek, niet meer op basis van aardgas geproduceerd mag worden, dan zou dit de economische situatie wel kunnen veranderen.
- Bij het grote bedrijf (scenario 2) kan een deel van de kosten voor stroomverbruik worden teruggewonnen uit warmte van het plasmabehandlungsproces. Deze warmte wordt ingezet voor verwarming van de vergister en overige processen op die locatie.
- Op beide bedrijven wordt inderdaad wel bespaard op aankoop N kunstmest en mestafzetkosten. Zoals eerder gemeld, is echter het probleem bij de aanwending van NEO dat de inzet van NEO beperkt blijft tot de gebruiksruijme N dierlijke mest. Bij de gehalten in N dierlijk en N kunstmest in NEO is dus de gebruiksruijme N dierlijk nog steeds limiterend. Hierdoor dient een hoeveelheid NEO te worden afgezet terwijl de kunstmestruimte nog niet volledig is benut.
- Totaal van opbrengsten uit SDE, energieproductie, vermeden kunstmestkosten en vermeden mestafzetkosten wegen niet op tegen de exploitatielasten. Derhalve leidt toepassing van een plasma unit op het gemiddelde melkveebedrijf tot een toename van de kosten van ca. 1.569 euro per melkkoe per jaar. Bij toepassing van de schaalfactor op plasma units wordt dit ca. 1.208 euro per melkkoe. Voor het grotere bedrijf zijn deze bedragen resp. 988 euro en 724 euro per melkkoe.

⁴⁵ Zie ook [Prijzen en gebruik van stikstofkunstmest: Wat doen de deelnemers van het LMM? - WUR](#) (geraadpleegd januari 2025).

- Als de plasma technologie energie-efficiënter wordt (verbruik van 50 in plaats van 100 kWh/m³ dunne fractie) dan worden de energiekosten in beide scenario's de helft minder: resp. 230 en 250 euro per melkkoe. De kosten kunnen ook lager uitvallen, als bij gebruik van zelf opgewekte elektriciteit (deels) met kost- en/of opbrengstprijzen gerekend kan worden.
- Zodra de CO₂-emissie wordt belast (bij gebruik van hernieuwbare energiebronnen) en/of de emissiereductie beloofd (incl. 'license to operate'), kan deze kostenberekening een positiever beeld opleveren.

6.5 Discussie modelberekening

Het betreft hier een nieuwe technologie, waardoor er weinig onafhankelijke en praktijkdata beschikbaar is. De aannames kunnen daarom bij een verdere R&D en optimalisatie traject anders worden en tot andere resultaten leiden.

Opslag van NEO

De dunne fractie van drijfmest of digestaat heeft na de plasmabehandeling een pH van 5,5. Deze NEO wordt opgeslagen in een aparte silo of eventueel onder de dichte vloer in een stal. Het is niet wenselijk dat er verse mest bijkomt, anders zal de pH weer gaan stijgen. Het is echter onduidelijk hoelang de pH op het niveau van 5,5 blijft. Dit is essentieel voor de emissiereductie. Voor de langdurige opslag van NEO adviseert het bedrijf een pH-waarde van 5 te gebruiken om te zorgen dat de pH van NEO gedurende de opslagperiode onder 6 blijft. Volgens de leverancier zal de NEO in de opslag rondgepompt moeten worden om denitrificatie te voorkomen, de pH dient te worden gemonitord en de NEO zal eventueel opnieuw door de plasma unit worden behandeld. Bij de economische berekeningen is geen rekening gehouden met deze vervolgbehandeling. Voor een melkveebedrijf is het ook noodzakelijk om een grote voorraad NEO te hebben. Als bijvoorbeeld bij een eerste snede 30 m³ rundermest per hectare nodig is, kan dezelfde hoeveelheid N worden gegeven met 21 m³ NEO. Voor een gemiddeld bedrijf met 48 ha grasland (scenario 1), is dan ca. 1.000 m³ NEO nodig. Bij een capaciteit van 5 m³ NEO per dag per installatie (2 installaties), betekent voor het gemiddelde Nederlandse melkveebedrijf dat ca. 3 maanden nodig is om die voorraad aan te leggen.

Emissie ammoniak bij aanwending

In het rekenmodel wordt een emissiefactor gebruikt die afhankelijk is van de vracht TAN (emissiefactor is % emissie van TAN aangewend). Er is uitgegaan van 12,9% van TAN bij (emissiearm) aanwending op grasland en van 1,5% van TAN op bouwland. Pedersen en haar collega's (2024) rapporteren uit een experiment (met windtunnels) dat de ammoniakemissie van de met plasma behandelde varkensmest 4,9-5,3% van TAN en bij digestaat 5,1-13,2% van TAN opgebracht bij aanwending bedraagt. In vergelijking daarmee lijkt de in deze studie gehanteerde emissiefactor aan de hoge kant. Bij ander niet gepubliceerd werk (ADAS Ref: 1021782-09-09-21) wordt echter zelfs rekening gehouden met een ammoniakemissie van 36% van de TAN (in de eerste 160 uur na aanwending). Pedersen et al. (2024) melden dat hun werk zich uitsluitend richt op het effect van scheiding en plasmabehandeling op NH₃ en vluchtige organische stoffen emissies na aanwending. En dat hun werk alleen de dunne fracties onderzoekt. Dus om de ecologische, milieu en economische aspecten te kunnen beoordelen moeten ook andere aspecten worden onderzocht (ibid.). In onze studie wordt ook rekening gehouden met dikke fracties, die minder goed emissiearm aangewend kunnen worden en dan daarom een hogere emissie dan drijfmest zullen hebben.

Emissie van lachgas

Ten aanzien van de emissies van lachgas bestaan veel onzekerheden in de modellering, omdat het effect van plasmatechnologie op de emissie van N₂O uit mest nog niet bekend is en er ook een aandeel uit luchtstikstof gebruikt in het proces zal zijn (zie Hoofdstuk 4). De emissie van lachgas tijdens de plasmabehandeling is ingeschat op basis van een mondelinge opgave vanuit N2 Applied (N₂O wordt berekend als 1% van de N-verrijking) en dus zijn geen gemeten waarden ingevoerd. De berekeningen van de lachgasemissie laten een toename van de emissie zien bij de beide scenario's. Echter gezien de vele onzekerheden rondom de toegepaste emissiefactoren, kunnen hier geen harde conclusies aan worden verbonden. Bij de opslag en aanwending is gerekend met emissiefactoren voor N₂O uit het NEMA-model die gelden voor reguliere drijfmest. Er zijn echter aanwijzingen dat de lachgasemissie hoger zou kunnen uitvallen dan bij gebruik van reguliere mest: uit een veldproef met varkensmest (Lloyd et al., 2023) bleek de emissie van N₂O bij gebruik van NEO ruim een factor 4 hoger dan bij gebruik van onbehandelde mest. Anderzijds zou gezien de zuurgraad bovengrondse aanwending tot de mogelijkheden kunnen behoren, wat het risico op (de-)nitrificatie en dus N₂O-emissie verlaagt.

Hergebruik warmte

Bij de economische berekeningen is meegenomen dat 60% van het energieverbruik van de GEA-N2 Applied unit als warmte kan worden teruggewonnen. Er is aangenomen dat de helft van die 60% ook daadwerkelijk ingezet en benut kan worden op de bedrijven. Er dient dan namelijk wel een proces aanwezig te zijn waar de warmte voor kan worden ingezet. Verder is het de vraag of alle teruggewonnen warmte in de tijd gezien ook 1 op 1 beschikbaar is bij de dan geldende warmtevraag (seizoen afhankelijkheid / proces afhankelijkheid). Dit betekent dat voor elke situatie steeds de inzet van warmte berekend moet worden en dat wat voor het ene bedrijf geldt, moeilijk is te vertalen naar een ander bedrijf. Uit de berekeningen bleek dat het toepassen van de plasmatechnologie bij de gekozen scenario's niet rendabel is; het hergebruik van warmte is een belangrijk punt qua energietransitie en klimaat, maar volgens de modelberekening is het economisch gezien niet doorslaggevend voor een goede businesscase.

Capaciteit van de units

In de economische calculaties is een schaalfactor toegepast, waardoor de kosten lager worden. Om de markt in de Nederlandse veehouderij te bedienen, kan het wenselijk zijn dat er meerdere capaciteiten leverbaar zijn om de grootte van de installatie meer passend te maken op het aanbod mest. Anderzijds worden de productiekosten verhoogd als er meerdere capaciteiten door een fabriek geleverd moeten worden. In deze studie is geen onderzoek gedaan naar de optimalisatie hiervan.

7 Conclusies

In dit laatste hoofdstuk worden de meest relevante inzichten uit deze evaluatie puntsgewijs samengevat.

- De doelstelling van deze studie is om de kansen en opgaven van plasmatechnologie te onderzoeken om methaan- en ammoniakemissie uit mest in de veehouderij te reduceren. Echter is het primaire doel van de hier geëvalueerde plasmatechnologie het verrijken van dunne fracties van mest. Uit de literatuur en gesprekken met experts is duidelijk dat deze toepassing zeer interessant is. Hiermee kan stikstof uit de lucht in deze fracties gefixeerd worden en als kunstmest in de landbouw toegepast worden. In dit rapport is een studie gepresenteerd naar de verrijking van de dunne fractie van mest/digestaat, maar hetzelfde principe kan ook met water worden toegepast om kunstmest te maken. De productie van kunstmest gebeurt op basis van elektriciteit die uit hernieuwbare bronnen geproduceerd kan worden in plaats van op basis van aardgas zoals met het H-B proces. Om de klimaatdoelen te bereiken en hoge productieniveaus te behouden biedt plasma een oplossing voor de landbouw.
- De zienswijze ten aanzien van dunne fracties die met de plasma unit zijn behandeld maakt het mogelijk dat de stikstof die uit de lucht wordt toegevoegd (minerale N) als kunstmest wordt gezien en dus in de kunstmestruimte wordt geteld, terwijl de organische stikstof en ammonium die al in de dunne fractie stond nog steeds gezien en geteld wordt als dierlijke mest. Dat de door plasma aan de dunne fractie toegevoegde N kan worden gebruikt als kunstmestvervanger kan de implementatie van deze technologie in de Nederlandse context faciliteren. Voor andere landen zonder mestoverschot is sowieso deze toepassing nu al interessant. Echter uit de berekeningen blijkt dat ook bij NEO (met daarin N-dierlijk en 'kunstmest-N') tegen de grens van maximaal 170 kg N uit dierlijke mest wordt aangelopen. De N uit dierlijke mest wordt namelijk niet verlaagd⁴⁶. Hierdoor zal niet alle NEO op het eigen bedrijf aangewend kunnen worden of men moet zoveel NEO produceren als binnen de gebruiksruimte voor N uit dierlijke mest geplaatst kan worden. In het laatste geval moet er alsnog kunstmest worden aangekocht.
- Het huidige elektragebruik van de plasma unit per kubieke meter dunne fractie maakt bredere implementatie op korte termijn onwaarschijnlijk. Als bijvoorbeeld vanwege het klimaatbeleid kunstmest geproduceerd door het Haber-Bosch proces niet meer toegediend mag worden, dan kan de implementatie van plasma in een versnelling komen. Ook wordt momenteel veel geëxperimenteerd en verschillende R&D trajecten uitgevoerd door kennisinstellingen en bedrijven rondom plasma, waardoor de verwachting is dat de energie-efficiëntie van plasmareactoren kan worden verbeterd.
- De pH die wordt bereikt in de met de plasma unit behandelde dunne fracties is een interessante bijwerking. Ten aanzien van de ammoniak- en de methaanemissie moeten echter alle eerdere stappen en processen emissiearm worden uitgevoerd (stalvloer, kelders, pompen, scheiding, opslagen, etc.). Mocht dit op een bedrijf toegepast worden dan is de vraag of plasma (in combinatie met deze andere maatregelen) met andere emissiereductie maatregelen zoals luchtwassers, mest koelen of het aanzuren van drijfmest kan concurreren om de totale bedrijfsemissie te reduceren. Uit de modelberekening blijkt de grootste reductie voor ammoniak- en methaanemissie veroorzaakt te worden doordat er minder of geen mest in de stal wordt opgeslagen. De emissiereductie bij de opslag (daar waar NEO het grootste effect heeft) is een beperkt onderdeel in de totale emissie. De ammoniakemissie bij opslag en aanwending van de dikke fractie (die uiteraard niet aangezuurd wordt door de plasmatechniek) is een ongunstig neveneffect.
- NEO is door de verlaagde pH theoretisch gezien in staat om de ammoniakemissie bij het aanwenden van de dunne fractie van mest en digestaat te reduceren.
- Aanvullend onderzoek moet worden uitgevoerd naar de emissies van broeikasgassen (CO₂, CH₄ en N₂O) evenals die van stikstofoxiden die worden uitgestoten tijdens de plasmabehandeling van dunne fracties. In deze studie is slechts eenmaal en gedurende een beperkte tijd gemeten, maar zijn hoge concentraties van CO₂, N₂O en NO_x waargenomen.

⁴⁶ In sommige gevallen zal stijging plaatsvinden, omdat emissies uit de stal worden voorkomen.

-
- De huidige capaciteit van de plasma unit om dunne fracties te verwerken (3-5 m³/dag) is een issue ten aanzien van de dagelijkse productie van mest en dunne fracties op melkveebedrijven. Meerdere units en emissiearme mestopslagen (voor zowel dikke als dunne fracties) zijn vereist waardoor de implementatie duurder en ingewikkelder wordt. Dit samen met de energiebehoefte en mestregelgeving vraagt om een verdere ontwikkeling van de technologie om een gezond verdienmodel te creëren.

Dankwoord

Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur.

Henk Aarts (N2 Applied) en Harm Ypma (GEA).

Melkveebedrijf André Hoeve.

Jos van Gastel (Promillicon).

Wageningen Livestock Research: Klaas Blanken, Geert Kupers, Martin Geukens en Luuk Gollenbeek.

Literatuur

- An, H., Lee, J.-C., Park, R. & Kim, H.-W. (2021). Integration of submerged microfiltration and cold plasma for high-strength livestock excreta. *Journal of Hazardous Materials*, 401(5), 123280. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.123280.
- Baldé, H., Wagner-Riddle, C., MacDonald, D. & VanderZaag, A. (2022). Fugitive methane emissions from two agricultural biogas plants. *Waste Management*, 151, 123-130. doi:10.1016/j.wasman.2022.07.033.
- Cherkasov, N., Ibhaddon, A.O. & Fitzpatrick, P. (2015). A review of the existing and alternative methods for greener nitrogen fixation. *Chemical engineering and Processing: Process Intensification*, 90, 24-33. doi:10.1016/j.cep.2015.02.004.
- Dawson, C.J. & Hilton, J. (2011). Fertiliser availability in a resource-limited world: Production and recycling of nitrogen and phosphorus. *Food Policy*, 36, S14-S22. doi:10.1016/j.foodpol.2010.11.012.
- De Sutter, R. (2014). Mestgassen: (levens)gevaarlijk, onderschat en hulprocedures onbekend. Persbericht [Press release]. Retrieved from https://www.varkensloket.be/Portals/63/Documents/Persbericht_PreventAgri.pdf.
- Elsgaard, L., Olsen A.B. & Petersen S.O. (2016). Temperature response of methane production in liquid manures and co-digestates. *Science of the Total Environment*, 539, 78-84. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.07.145.
- Erisman, J.W., Sutton, M. A., Klimont, J., Galloway, Z. & Winiwarter, W. (2008). How a century of ammonia synthesis has changed the world. *Nature Geoscience*, 1, 636-639.
- Fangueiro, D., Hjorth, M. & Gioelli, F. (2015). Acidification of animal slurry – a review. *Journal of Environmental Management*, 149, 46-56. doi:10.1016/j.jenvman.2014.10.001.
- Geilenkirchen, G., Bolech, M., Hulskotte, J., Dellaert, S., Ligterink, N., Van Eijk, E., Geertjes, K., Kosterman, M. & 't Hoen, M. (2024). *Methods for calculating the emissions of transport in the Netherlands*. Bilthoven. National Institute for Public Health and the Environment, RIVM. RIVM report 2024-0023. doi:10.21945/RIVM-2024-0023.
- Gollenbeek, L.R., Van Gastel, J.P.B.F., Casu, F.A.M., Huisman, I. & Verdoes, N. (2022). *Berekeningen emissies en economie voor verschillende scenario's voor verwaarding van rundveemest; NL Next Level Mestverwaarden*. Wageningen Livestock Research. Rapport 1372. doi:10.18174/569408.
- Goulding, K.W.T., Trewavas, A.J. & Giller, K.E. (2009). *Can organic farming feed the world? A contribution to the debate on the ability of organic farming systems to provide sustainable supplies of food*. Paper presented at the Conference of the International Fertiliser Society Cambridge, UK. Proceedings International Fertiliser Society, No. 663. 1-27. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20103163266>.
- Graves, D.B., Bakken, L.B., Jensen, M.B. & Ingels, R. (2019). Plasma Activated Organic Fertilizer. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 39, 1-19. doi:10.1007/s11090-018-9944-9.
- Groenestein, C.M., Goedhart, P.W., Van Bruggen, C., De Jonge, I. & Ogink, N.W.M. (2023). Schatting van stikstofverliezen uit stallen op basis van stikstof-fosfaat verhouding in afgevoerde mest - Evaluatie van de NP-methode en effect van staltype. Wageningen Livestock Research, Rapport 142610. doi:18174/631641.
- Habtewold, J., Gordon, R., Sokolov, V., VanderZaag, A., Wagner-Riddle, C. & Dunfield, K. (2018). Targeting bacteria and methanogens to understand the role of residual slurry as an inoculant in stored liquid dairy manure. *Applied and Environmental Microbiology*, 84(7), 1-15. doi:10.1128/AEM.02830-17.
- Holly, M.A., Larson, R.A., Powell, J.M., Ruark, M.D. & Aguirre-Villegas, H. (2017). Greenhouse gas and ammonia emissions from digested and separated dairy manure during storage and after land application. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 239, 410-419. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.007>.
- Huijsmans, J.F.M., Hol, J.M.G. & Van Schooten, H.A. (2015). Toediening van aangezuurde mest met een sleepvoetenmachine op grasland. Ammoniakemissie en gewasopbrengst. Wageningen UR Plant Research International. Rapport 629.
- Im, S., Mostafa, A. & Kim, D.-H. (2021). Use of citric acid for reducing CH₄ and H₂S emissions during storage of pig slurry and increasing biogas production: Lab- and pilot-scale test, and assessment. *Science of the Total Environment*, 753, 142080. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142080.
- Ingels, R. (2012a). Energy efficient process for producing nitrogen oxide. European Patent Office. EP2704989B1.
- Ingels, R. (2012b). Processes and plants for reducing ammonia loss and odor from organic material or waste to the atmosphere. United States Patent. US 9,440,889 B2.
- Ingels, R. (2019a). Nitrogen enrichment of organic fertilizer with nitrate and air plasma. World International Patent Organization. WO 2020/085917 A8.
- Ingels, R. (2019b). Low pressure generating plasma reactor closed loop process and system. World Intellectual Property Organization. WO 2020/085917 A1.
- Ingels, R. & Graves, D.B. (2015). Improving the efficiency of organic fertilizer and nitrogen use via air plasma and distributed renewable energy. *Plasma Medicine*, 5(2-4), 257-270. doi:10.1615/PlasmaMed.2016015763.

- Kasper, P.L., Dolriis, M.D., Fuchs, A., Kai, P. & Riis, A.L. (2022). SVOVLSYREFORSURING I KVÆGSTALDE. Mælkeafgiftsfonden. SEGES Innovation Udgivet 14. Marts 2022.
- KWIN (2023) *Kwantitatieve Informatie Veehouderij 2023-2024*. Wageningen. Wageningen Livestock Research, Handboek 47.
- Kompatscher, K. & Traversari, A.A.L. (2022). *Literatuurstudie naar de toepassing van verschillende luchtreinigingsmethoden voor inactivatie van microbiologische verontreinigingen*. Delft. TNO. R11245.
- Lee, J-C., Park, R., Yoo, K.S. & Kim, H-W. (2021). Coupling cold plasma and membrane photobioreactor for enhanced fouling control during livestock excreta treatment. *Chemosphere*, 265, 129031. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.129031.
- Li, S., Medrano, J.A., Hessel, V. & Gallucci, F. (2018). Recent Progress of Plasma-Assisted Nitrogen Fixation Research: A Review. *Processes*, 6, 248. doi:10.3390/pr6120248.
- Lloyd, I., Grayson, R.P., Galdos, M.V., Morrison, R. & Chapman, P.J. (2023). *Greenhouse gas fluxes from winter wheat fertilised with treated and untreated pig slurry*. Paper presented at the RAMIRAN 2023. 18th International Conference, Cambridge, UK. <https://resources.rskgroup.com/view/535287122/38/>.
- Lukes, P., Dolezalova, E., Sisrova, I. & Clupek, M. (2014). Aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from an air discharge plasma in contact with water: evidence for the formation of peroxyxynitrite through a pseudo-second-order post-discharge reaction of H₂O₂ and HNO₂. *Plasma Sources Science and Technology*, 23(1), 015019. doi:10.1088/0963-0252/23/1/015019.
- Maasdam, E., Daatselaar, C., Oonk, H., Bondt, N., Jansen, L. & Kroes, K. (2024). *Methaanoxidatie bij mestopslagen; Voortgangsverslag deel 1: werking en aandachtspunten voor 3 methaanoxidatie technieken*. Wageningen. Wageningen Livestock Research. Rapport 1472. 10.18174/650013.
- Magureanu, M., Mandache, N.B. & Parvulescu, V.I. (2015). Degradation of pharmaceutical compounds in water by non-thermal plasma treatment. *Water Research*, 81, 124-136. doi:10.1016/j.watres.2015.05.037.
- Meng, S., Li, S., Sun, S., Bogaerts, A., Liu, Y. & Yi, Y. (2024). NH₃ decomposition for H₂ production by thermal and plasma catalysis using bimetallic catalysts. *Chemical Engineering Science*, 283, 119449. doi:10.1016/j.ces.2023.119449.
- Mousavi, H., Cottis, T., Hoff, G. & Solberg, S.Ø. (2022a). Nitrogen Enriched Organic Fertilizer (NEO) and Its Effect on Ryegrass Yield and Soil Fauna Feeding Activity under Controlled Conditions. *Sustainability*, 14(4), 2005. doi:10.3390/su14042005.
- Mousavi, H., Cottis, T., Pommeresche, R., Dörsch, P. & Solberg, S.Ø. (2022b). Plasma-Treated Nitrogen-Enriched Manure Does Not Impose Adverse Effects on Soil Fauna Feeding Activity or Springtails and Earthworms abundance. *Agronomy*, 12(10), 2314. doi:10.3390/agronomy12102314.
- Muhmood, A., Wang, X., Dong, R., Xiao, H. & Wu, S. (2021). Quantitative characterization and effective inactivation of biological hazards in struvite recovered from digested poultry slurry. *Water Research*, 204, 117659. doi:10.1016/j.watres.2021.117659.
- Nayak, G., Andrews, A.J., Marabella, I., Aboubakr, H.A., Goyal, S.M., Olson, A.O., Torremorell, M. & Bruggeman, P.J. (2020). Rapid inactivation of airborne porcine reproductive and respiratory syndrome virus using an atmospheric pressure air plasma. *Plasma Processes and Polymers*, 17(10), e1900269. doi:10.1002/ppap.201900269.
- Pankaj, S.K., Bueno-Ferrer, C., Misra, N.N., Milosavljević, V., O'Donnell, C.P., Bourke, P., Keener, K.M. & Cullen, P.J. (2014). Applications of cold plasma technology in food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 35(1), 5-17. doi:10.1016/j.tifs.2013.10.009.
- Pedersen, J., Labouriau, R. & Feiling, A. (2024). Effect of slurry separation and air-plasma treatment on NH₃ and VOC emissions from field applied biogas digestate and pig slurry to grassland. *Biosystems Engineering*, 247, 257-266. doi:10.1016/j.biosystemseng.2024.09.014.
- Petersen, S.O., Andersen, A.J. & Eriksen, J. (2012). Effects of Cattle Slurry Acidification on Ammonia and Methane Evolution during Storage. *Journal of Environmental Quality*, 41(1), 88-94. doi:10.2134/jeq2011.0184.
- Petersen, S.O., Hojberg, O., Poulsen, M., Schwab, C. & Eriksen, J. (2014). Methanogenic community changes, and emissions of methane and other gases, during storage of acidified and untreated pig slurry. *Journal of Applied Microbiology*, 117(1), 160-172. doi:10.1111/jam.12498.
- Petersen, S.O., Olsen, A.B., Elsgaard, L., Triolo, J.M. & Sommer, S.G. (2016). Estimation of Methane Emissions from Slurry Pits below Pig and Cattle Confinements. *PLoS ONE* 11(8): e0160968. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160968>.
- Postma, R., Ehlert, P.A.I., Roefs, J. & Gollenbeek, L.R. (2020). *Contaminanten en wetgeving bij mestproducten*. Wageningen. Wageningen Livestock Research. Rapport 1269. doi:10.18174/530719.
- Puente-Rodríguez, D., Bos, A.P. & Vonk, J. (2023). *Milieutechnologieën in de melkveehouderij tegen klimaatverandering; Testen en bemeten van (bijna) praktijkrijpe combinaties van technieken om methaanemissie uit mest in bestaande melkveestallen te verminderen*. Wageningen. Wageningen Livestock Research. Rapport 1419. doi:10.18174/530719.

- Puente-Rodríguez, D., Gollenbeek, L.R., Verdoes, N. & Bos, A.P. (2022). *Perspectief van het aanzuren van mest in Nederland om methaan- en ammoniakemissie te reduceren*. Wageningen. Wageningen Livestock Research. Rapport 1375. doi:10.18174/572080.
- Puente-Rodríguez, D., Hopster, H., Gollenbeek, L.R., Mica, J.H. & Bokma, S. (2025). *Milieutechnologieën voor de verduurzaming van de vleeskalverhouderij: Evaluatie van kansrijke maatregelen om de ammoniak- en methaanemissies in de vleeskalverhouderij te reduceren*. Wageningen Livestock Research. In voorbereiding.
- Ruysenaars, P.G., Van der Net, L., Coenen, P.W.H.G., Rienstra, J.D., Zijlema, P.J., Arets, E.J.M.M., Baas, K., Dröge, R., Geilenkirchen, G., 't Hoen, M., Honig, E., Van Huet, B., Van Huis, E.P., Koch, W.W.R., te Molder, R.M., Montfoort, J.A. & Van der Zee, T. (2022). *Greenhouse gas emissions in the Netherlands 1990–2020. National Inventory Report 2022*. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Ministry of Health, Welfare and Sport. doi:10.21945/RIVM-2022-0005.
- Robinson, C. & Stapelmann, K. (2024). Plasma treating water for nitrate based nitrogen fertilizer - a review of recent device designs. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, In Press, Journal Pre-proof. doi:10.1016/j.cogsc.2024.100978.
- Schott, C., Yan, L., Gimbutyte, U., Cunha, J.R., Van der Weijden, R.D. & Buisman, C. (2023). Enabling efficient phosphorus recovery from cow manure: Liberation of phosphorus through acidification and recovery of phosphorus as calcium phosphate granules. *Chemical Engineering Journal*, 460, 141695. doi:10.1016/j.cej.2023.141695.
- Shaw, A., Shama, G. & Iza, F. (2015). Emerging applications of low temperature gas plasmas in the food industry. *Biointerphases*, 10(2), 029402. doi:10.1116/1.4914029.
- Slaets, J., Loenders, B. & Bogaerts, A. (2023). Plasma-based dry reforming of CH₄: Plasma effects vs. thermal conversion. *Fuel*, 360, 130650. doi:10.1016/j.fuel.2023.130650.
- Smil, V. (2002). Nitrogen and food production: proteins for human diets. *Ambio*, 31(2), 126-131. doi:10.1579/0044-7447-31.2.126.
- Tessier, D. (2013). Surface modification of biotextiles for medical applications. In M.W. King, B.S. Gupta, & R. Guidoin (Eds.), *Biotextiles as Medical Implants: A volume in Woodhead Publishing Series in Textiles* (pp. 137-156): Woodhead Publishing Series in Textiles.
- Van Bruggen, C., Bannink, A., Bleeker, A., Bussink, D.W., Van Dooren, H.J.C., Groenestein, C.M., Huijsmans, J.F.M., Kros, J., Lagerwerf, L.A., Oltmer, K., Ros, M.B.H., Van Schijndel, M.W., Schulte-Uebbing, L., Velthof, G.L. & Van der Zee, T.C. (2023). *Emissies naar lucht uit de landbouw berekend met NEMA voor 1990-2021*. Wageningen. WOT Natuur & Milieu. WOT-technical report 242.
- Van Dijk, W., Postma, R., Gollenbeek, L.R., Mostert, P., Roefs, J. & Verdoes, N. (2020). *Behoeftes mestbewerkingsproducten in Nederland en Europa: Inventarisatie perspectievolle product-markt-combinaties*. Wageningen. Wageningen Plant Research. WPR-1011. doi:10.18174/528800.
- Van Dooren, H.J.C., Bokma, S. & Ogink, N.W.M. (2019). *Ammoniakemissie tijdens frequent mixen van drijfmest met lucht*. Wageningen. Wageningen Livestock Research. Rapport 1170.
- Van Polen, S. (2020). *Ontwikkelingen in de energierekening tot en met 2030. Achtergrond-rapport bij de Klimaat- en Energieverkenning 2020*. Den Haag. Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). PBL-publicatienummer 4306.
- VanderZaag, A. & Baldé, H. (2022). Nutrient recovery abates methane emissions from digestate storage. *Bioresource Technology Reports*, 18, 101086. doi:10.1016/j.biteb.2022.101086.
- Vervloessem, E., Aghaei, M., Jardali, F., Hafezkhiani, N. & Bogaerts, A. (2020). Plasma-Based N₂ Fixation into NO_x: Insights from Modeling toward Optimum Yields and Energy Costs in a Gliding Arc Plasmatron. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(26), 9711-9720. doi:10.1021/acssuschemeng.0c01815.
- Witarsa, F. & Lansing, S. (2015). Quantifying methane production from psychrophilic anaerobic digestion of separated and unseparated dairy manure. *Ecological Engineering*, 78, 95-100. doi:10.1016/j.ecoleng.2014.05.031.
- Yao, S., Nakayama, A. & Suzuki, E. (2001). Acetylene and Hydrogen from Pulsed Plasma Conversion of Methane. *Catalysis Today*, 71(1-2), 219-223. doi:10.1016/S0920-5861(01)00432-1.
- Zhang, X., Liu, C., Liao, W., Wang, S., Zhang, W., Xie, J. & Gao, Z. (2022). Separation efficiency of different solid-liquid separation technologies for slurry and gas emissions of liquid and solid fractions: a meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 310, 114777. doi:10.1016/j.jenvman.2022.114777.
- Zhang, Y., Mo, J., Li, Y., Sundell, J., Wargocki, P., Zhang, J., Little, J.C., Corsi, R., Deng, Q., Leung, M.H.K., Fang, L., Chen, W., Li, J. & Sun, Y. (2011). Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review. *Atmospheric Environment*, 45(26), 4329-4343. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.05.041.

Bijlage 1 Overzicht NEN-nummers bij de gebruikte analysemethoden van het WLR-Servicelaboratorium

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

Bijlage 2 Protocol for estimation of methane production rates in manure

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

Background

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

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

Briefly, about the incubation conditions: Slurry samples are sieved to exclude straw and bedding material. This is supported by information presented in Elsgaard et al. (2016)⁴⁷. This paper also showed nearly identical temperature response after 17 and 41 h incubation of a selected slurry sample; based on this the procedure described below is flexible and recommends an 18-24 h time window, but of course the exact time of incubation should be recorded. The temperature response, Q10, was similar among different manure materials (Elsgaard et al., 2016), and therefore adjustment of temperature with a limited range seems acceptable.

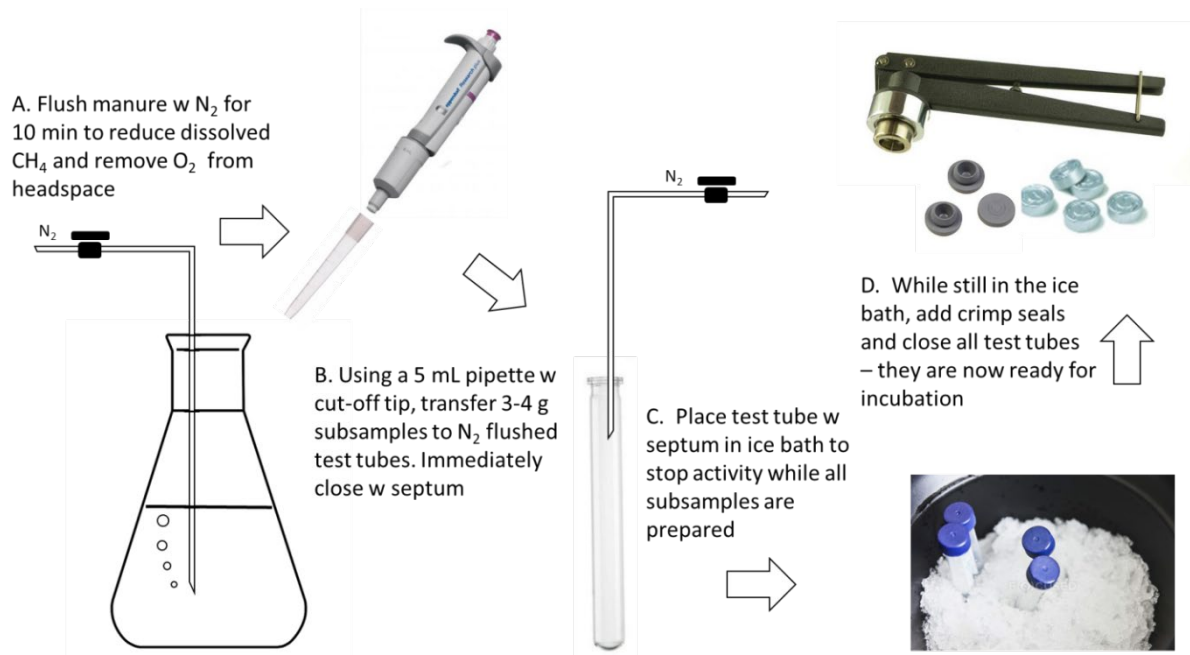
Principle

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

⁴⁷ “Slurry materials were sieved to <2 mm in order to allow reproducible subsampling of 3-g aliquots for the TGI incubations. Rico et al. (2007) sieved cow manure to <1 mm and examined the composition and CH₄ production at 35 °C of untreated and sieved manure. Mainly cellulose and hemicellulose was removed by sieving, while the relative proportions of fat and protein increased; accumulated CH₄ production per g VS after 45 d was 20% greater in the sieved manure, indicating a modest change in CH₄ production potential as a result of sieving. However, shifting the balance between dissolved and particulate organic matter could change the immediate degradability and hence the short-term dynamics of CH₄ production. A recent study by Witarsa and Lansing (2015) examined the time course of CH₄ production in untreated and screw-press separated dairy manure at 14 and 24 °C. They found greater long-term production of CH₄ from VS in untreated manure, but no significant difference in CH₄ production during the first 16 d at either temperature. This implies that for determination of CH₄ production rates in short-term incubations (here, <2 d), sieved manure is an acceptable representation of the intact sample.” (Elsgaard et al., 2016)

Equipment (see also illustration below)

- Pressurised N₂ for flushing
- Gas tubing with disposable extension to bubble manure sample.
- Test tubes (18 x 150 mm) for crimp sealing⁴⁸
- Racks for test tubes
- Butyl rubber septa
- Crimp seals + Crimper to close test tubes
- ~~Box/tray with ice water~~
- Cooling water bath which can simulate the recorded ambient temperature.
- Glass syringe, 10 mL
- Plastic syringe, 5 or 10 mL for gas sampling
- Injection needles ("blue base")
- ~~GC vials, for example 5.9 mL exetainers – prelabelled~~



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

Procedure

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

1. ~~A portion of manure is sieved <2 mm.~~ [from 26-7-2021 this step will be omitted. Only if the slurry is mixed with bedding that makes working with the sample difficult, a sieve with a large mesh size will be used.]
2. The manure sample is gently bubbled for 10-15 min with N₂ to remove CH₄ from the liquid phase; this is done to reduce the background of dissolved CH₄ in the subsamples for incubation.
3. Determine the weight of test tube + septum, to allow calculation of exact manure mass used for each replicate.
4. While continuously flushing the slurry with N₂, transfer 8 subsamples of c. 3 mL to 28 mL test tubes using a 5 mL pipette with a cut-off plastic tip. The recipient test tube should also be flushed with N₂ during this transfer to avoid oxygen contamination. [from 21-6-2021 the replicates per test at LeAF are 4, thus 6 tubes will be filled instead of 8]

⁴⁸ Link to test tube w crimp seal to be used for incubations (but there may be other suppliers)
[https://chemglass.com/\(X\(1\)S\(f1rpqqcrkj4yhrqmrzgw4bso\)\)/anaerobic-culture-tubes-aluminum-seals?AspxAutoDetectCookieSupport=1](https://chemglass.com/(X(1)S(f1rpqqcrkj4yhrqmrzgw4bso))/anaerobic-culture-tubes-aluminum-seals?AspxAutoDetectCookieSupport=1) The 10 mm thick butyl rubber stoppers shown here are difficult to penetrate, and I recommend using thinner butyl rubber septa – see step D in illustration above.

-
5. Immediately close the test tube (under N₂ headspace) with a butyl rubber stopper and record the weight (2 decimals) ~~before placing the test tube in an ice bath to suppress methanogenesis~~. [In the adjusted protocol, the ice bath is omitted. We will therefore not use the ice bath. Tubes are kept at room temperature, before they are put in the incubator. The time between filling the tubes and putting them in the incubator will be kept at a minimum. One manure sample per time will be incubated.]
 6. When all subsamples are ready, add a crimp seal to all test tubes and secure using the crimper.
 7. Evacuate and refill test tubes with N₂ three times to remove any residual oxygen [flushing only" is also allowed in the protocol, this is what we will do to make the headspace anaerobic]; ~~after the last refill with N₂ the pressure is released, and test tubes with N₂ headspace are returned to the ice bath until all samples are ready for incubation~~.
 8. Transfer 6 replicates to a water bath at a temperature that should not deviate by more than ± 3 °C from the ambient manure temperature recorded during sample collection. [from 21-6-2021 the number of replicates at LeAF is 4].
 9. The last 2 replicates are used for determination of background CH₄ concentrations immediately after the incubation has started: Shake vigorously for 30 s using a whirly mixer. Then insert a glass syringe and record any gas evolved (and 0 if no gas was evolved). Finally, add 4 mL N₂ using plastic syringe and hypodermic needle, mix by pumping with the piston, and then transfer 3 mL headspace gas to a pre-labelled GC vial⁴⁹.
 10. The incubation of manure samples should be terminated after 18-24 h. Around 30 min before termination, add 4 mL N₂ to all replicates (this will allow the gas to equilibrate to the ambient temperature). [from 21-6-2021 the test duration will be 7 days instead of 24 h]
 11. At the time of termination, and with test tubes still in the water bath, determine total over-pressure using a 10-mL glass syringe. [Currently, measurements with a pressure meter instead of a syringe are also allowed. LeAF will choose for the measurements with the pressure meter]. After reading the gas volume, transfer a 3-mL sample of the headspace gas to a GC vial. [at LeAF, the gas samples taken from the tubes will be diluted in a syringe and directly injected into the GC, and not first transferred to GC vials.]

⁴⁹ The total gas sample volume may vary from one lab to the next. If necessary, equilibrate GC vials with the gas used as matrix for calibration gases, and correct for the dilution when calculation CH₄ production rates. At AU we use 5.9 mL Exetainers (Labco Inc., Lampeter, UK) previously equilibrated to atmospheric pressure with a 20/80 mixture of O₂ and N₂.

Bijlage 3 Uitgangspunten voor mestopslag en -aanwending in de scenario berekeningen

Mestscheider

De mest wordt gescheiden met een schroefpers: 15% wordt dikke fractie en 85% dunne fractie. De dunne fractie heeft < 3mm deeltjesgrootte en < 7% droge stof (persoonlijke communicatie N2 Applied, december 2023).

Mestopslag

Bij de opslag van de mestproducten zijn de volgende uitgangspunten genomen:

	Eenheid	Referentiebedrijf	Scenariobedrijf 1	Referentiebedrijf	Scenariobedrijf
		1		2	2
Totaal aanwezige opslag	dagen	180	180	180	180
Waarvan buiten de stal in silo*	%	20	20	20	20
Opslag NEO (behandelde mest)	Dagen		180		180
Opslag dikke fractie	Dagen		180	180	180
Ontmestingsfrequentie melkvee*	Dagen		45	0,25	0,25
Ontmestingsfrequentie jongvee	Dagen		45	0	0
Reductie NH ₃ emissie stalsysteem**	%	0	0	38	38

* Bron: Van Bruggen et al., 2023.

** Bron: Besluit activiteiten leefomgeving, Bijlage V, HA1.31.

Mestaanwending

- Gescheiden dunne fractie van digestaat heeft een N-werkingscoëfficiënt van 80%.
- Normale drijfmest en dikke fractie heeft een N-werkingscoëfficiënt van 60%.
- De N-werkingscoëfficiënt van toegevoegde N in NEO 100% (zienswijze RVO / NVWA).
- NEO wordt emissiearm op eigen grond aangewend.

Grasland

- 170 kg N/ha uit dierlijke mest (RVO, zonder derogatie) en 320 kg N voor totaal N gift/ha.
- 90 kg fosfaat/ha (is afhankelijk van fosfaattoestand bodem) – RVO, grasland, P-AL 46 t/m 55, P-CaCl₂ 1,5 t/m 2,4.

Bouwland

- 170 kg N/ha (RVO, zonder derogatie).
- 60 kg fosfaat/ha (RVO, bouwland, P-AL 46 t/m 55, P-CaCl₂ 2,5 t/m 3,4).

Prijzen

- Kosten mestafzet: 20 €/ton (schatting toekomstig. Actueel 30 €/ton).
- Kosten aanwending dunne fractie: 5,85 €/ton (KWIN 2023-2024, zodenbemester).
- Kosten aanwending dikke fractie: 10 €/ton (KWIN 2023-2024, stalmeststrooier).
- Prijs kunstmest 1 €/kg N en 0,85 €/kg P₂O₅ (Gekozen uitgangspunt, globale prijs).

Emissies bij mest aanwenden

Voor grasland:

- Emissiefactor bij aanwenden (ondiepe injectie): 17% van de TAN (Van Bruggen et al., 2023).

-
- Emissiefactor bij aanwenden aangezuurd digestaat: 12,9% van de TAN (is 24% reductie; Huijsmans et al., 2015).

Voor bouwland (Van Bruggen et al., 2023):

- Bij mestinjectie: 2% van de TAN.
- Emissiefactor bij aanwenden aangezuurd digestaat: 1,5% van de TAN (is 24% reductie; Huijsmans et al., 2015).
- Dikke fractie onderwerken in 2 werkgangen: 46% van de TAN.

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.

