



---

## Perspectief van het aanzuren van mest in Nederland om methaan- en ammoniakemissie te reduceren

Daniel Puente-Rodríguez, Luuk Gollenbeek, Nico Verdoes, A.P. (Bram) Bos

Rapport 1375



**WAGENINGEN**  
UNIVERSITY & RESEARCH

---



# Perspectief van het aanzuren van mest in Nederland om methaan- en ammoniakemissie te reduceren

Daniel Puente-Rodríguez, Luuk Gollenbeek, Nico Verdoes, A.P. (Bram) Bos

Wageningen Livestock Research

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Livestock Research en gesubsidieerd door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoek thema 'Klimaat Slim Methaanemissie Veehouderij' (projectnummer BO-53-003-020).

Wageningen Livestock Research  
Wageningen, juni 2022

---

Rapport 1375



**WAGENINGEN**  
UNIVERSITY & RESEARCH

---

Samenvatting NL: Het aanzuren van mest is een kansrijk principe om de methaan- (uit mest) en ammoniakemissies te reduceren. Mest aanzuren heeft echter in Nederland geen voet aan de grond gekregen, onder andere door de hogere kosten van deze systemen ten opzichte van ammoniakemissiearme vloeren, de noodzaak van een externe mestopslag, zorgen over de mogelijke risico's op verzuring en verhoogde concentratie zwavel in de bodem en in het grond- en oppervlaktewater. Ten aanzien van emissies lag in Nederland lange tijd de focus met name op ammoniak. Vanwege de problematiek van klimaatverandering en de internationale en nationale klimaatdoelstellingen is daar de noodzaak bijgekomen om methaanemissies in de landbouw te beperken. In samenhang met de hardnekkige stikstofcrisis en de behoefte aan integrale oplossingen zou de balans ten aanzien van mest aanzuren mogelijk naar de andere kant kunnen omslaan. Het doel van deze studie is daarom om *kansen en belemmeringen voor de implementatie van systemen voor het aanzuren van mest in Nederland te identificeren*.

Summary UK: The acidification of manure is reported as a promising measure for reducing the emissions of ammonia and (manure related) methane. However, this measure has not been implemented in the Netherlands because of, among other reasons, the high costs compared to available flooring systems, the need for manure storage outside the barns, and concerns about the possible acidification of the soil and an increased concentration of sulfur in soils and surface water. Regarding emissions, the focus in the Netherlands was mainly on ammonia. Due to climate change and related national and international agreements, objectives are also being formulated regarding methane emissions. Therefore, the aim of this research is to identify opportunities and barriers for the implementation of manure acidification in the Netherlands.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/572080> of op [www.wur.nl/livestock-research](http://www.wur.nl/livestock-research) (onder Wageningen Livestock Research publicaties).



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

© Wageningen Livestock Research, onderdeel van Stichting Wageningen Research, 2022

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

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

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

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

---

# Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>5</b>
1.1	Aanleiding en doelstellingen	5
1.2	Methodologische opmerkingen	5
<b>2</b>	<b>Mest aanzuren – principes, type zuren en toepassingstechnieken</b>	<b>7</b>
2.1	Mechanisme emissiereductie	7
2.1.1	Methaan	7
2.1.2	Ammoniak	8
2.2	Type zuren & emissiereductie potentie	9
2.2.1	Anorganische zuren	9
2.2.2	Organische zuren	11
2.3	Toepassingstechnieken van mest aanzuren	12
2.3.1	Aanzuren van drijfmest bij aanwenden	12
2.3.2	Aanzuren van drijfmest in de directe nabijheid van de stal	13
2.3.3	Plasmatechnologie	14
2.3.4	Aanzuren van het inoculum	15
2.3.5	Aanzuren van de dunne fractie	15
2.3.6	Aanzuren van de mestoppervlakte	16
2.3.7	Aanzuren van de vloeroppervlakte	16
2.3.8	pH van de urine verlagen via het voer	16
<b>3</b>	<b>Aandachtspunten van mest aanzuren</b>	<b>17</b>
3.1	Ecologische (bodemkundig/landbouwkundige) aspecten	17
3.1.1	Zwavelzuur	17
3.1.2	Andere zuren	20
3.1.3	Verzuringseffect	21
3.2	Investerings- en operationele kosten & inpasbaarheid op het primaire bedrijf	21
3.2.1	Investerings- en operationele kosten	21
3.2.2	Inpasbaarheid op het bedrijf	24
3.3	Institutionele aspecten	25
<b>4</b>	<b>Conclusies</b>	<b>27</b>
	<b>Dankwoord</b>	<b>29</b>
	<b>Literatuur</b>	<b>30</b>

---

---

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding en doelstellingen

In het project 'Aanpassing melkveestallen voor minder methaan' (AM3) zijn verschillende combinaties van technieken getest en bemeten die in bestaande melkveestallen met een traditionele roostervloer toegepast kunnen worden. Het doel van deze technieken is om de methaanemissie uit mest sterk te verminderen. Denk daarbij bijvoorbeeld aan mestkoeling, het frequent afvoeren van mest uit de kelders, het grondig reinigen van de kelders, het afsluiten en afzuigen van de kelders en het onschadelijk maken van methaan (oxideren). Daarbij is het van groot belang dat de technieken makkelijk zijn in te passen in de bedrijfsvoering, bedrijfseconomisch verantwoord zijn toe te passen, en geen negatieve effecten hebben op de gezondheid en het dierenwelzijn van de koe of de gezondheid van veehouders en omwonenden. Het project is door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) gefinancierd binnen de Klimaatenvolop.

Een kansrijk principe om de methaanemissie uit mest te reduceren is het aanzuren van (drijf)mest (fracties). Door het toevoegen van zuren wordt de pH van mest verlaagd. Dit wordt gezien als een kansrijke maatregel waarmee afhankelijk van het zuur en de toegevoegde hoeveelheid, een reductie van de methaanemissie van 65-90% (van de emissie uit mest) bereikt kan worden (Petersen et al., 2012; Petersen et al., 2014; Sommer et al., 2017; Habtewold et al., 2018). In de wetenschappelijk literatuur wordt dit bovendien gezien als een kansrijke maatregel om tegelijk ook de ammoniakemissie te verminderen (ibid.). Het aanzuren kan zowel in de stal als tijdens het uitrijden gedaan worden. Bij aanzuren in de stal wordt in Denemarken een ammoniakemissie reductie in de melkveehouderij van rond 40% aangehouden en bij aanwenden van 49%.

In Denemarken is al ongeveer tien jaar een systeem als emissie-reducerende maatregel toegestaan en gecommmercialiseerd waarbij op het primaire bedrijf, met positieve resultaten mest met zwavelzuur wordt aangezuurd (JH Forsuring NH4+)<sup>1</sup>. Volgens een VERA-statement leidt deze techniek tot een reductie van de ammoniakemissie van 64% in de varkenshouderij.<sup>2</sup> Het wordt ook toegepast in de melkveehouderij. Momenteel zijn er 75 melkveebedrijven en 76 varkensbedrijven voorzien van dit systeem. Daarbij wordt in Denemarken mest ook aangezuurd tijdens aanwending. Mest aanzuren heeft echter in Nederland geen voet aan de grond gekregen, o.a. door de hogere kosten van deze systemen ten opzichte van ammoniakemissiearme vloeren en de noodzaak van een externe mestopslag (Bossin, 2015; Jacobsen, 2017; Schils, 2016). Daarbij speelden ook zorgen over de mogelijk risico's op verzuring van de bodem en een verhoogde concentratie zwavel in de mest, zwavelgiften en sulfaatconcentraties in grond- en oppervlaktewater bij het gebruik van zwavelhoudende meststoffen in de landbouw (CDM, 2014).

Ten aanzien van de emissie lag in Nederland lange tijd de focus met name op ammoniak. Vanwege de problematiek van klimaatverandering en de internationale en nationale klimaatdoelstellingen is daar de noodzaak bijgekomen om methaanemissies in de landbouw te beperken. In samenhang met de hardnekkige stikstofcrisis en de behoefte aan integrale oplossingen zou de balans ten aanzien van mest aanzuren mogelijk naar de andere kant kunnen doen omslaan. Het doel van deze studie is daarom om *kansen en belemmeringen voor de implementatie van systemen voor het aanzuren van mest in Nederland te identificeren*.

## 1.2 Methodologische opmerkingen

In dit rapport wordt een overzicht gegeven van de stand der kennis van zuren, aanzuurprincipes en - technieken. Daarnaast wordt hier gekeken naar institutionele, bedrijfsmatige en bodem- en landbouwkundige aandachtspunten voor implementatie van deze maatregel in Nederland.

---

<sup>1</sup> JH AGRO A/S - *Environmental Solutions for Animal Production* (geraadpleegd maart 2022).

<sup>2</sup> VERA-Urkunde006\_JH-Forsuring-NH4.indd (vera-verification.eu) (geraadpleegd maart 2022).

---

Hiervoor werd een deskstudie uitgevoerd. Daarbij werd zowel de zogenoemde 'grijze literatuur' (bijv. websites, notities, rapporten, beleidsadvies, etc.) als de wetenschappelijk literatuur geraadpleegd. In de database Scopus werd bijvoorbeeld gezocht (mei 2021) naar 'manure acidification'. Tussen 2018 en 2021 leverde dit 200 hits. De abstracts werden gelezen en de voor ons relevante publicaties werden gebruikt voor deze studie.

Verder werden er een aantal semi gestructureerde interviews met onderzoekers in Nederland en in Denemarken uitgevoerd. De expertise en instellingen van de geïnterviewde deskundigen is:

- Milieutechnologie, mestmanagement en huisvestingsystemen in de veehouderij. Werkzaam bij de Aarhus University en de 'Danish Environmental Protection Agency' (DK).
- Plantenvoeding, bodem en landbouw. Medeauteur van een notitie uit 2011 waarin verschillende aspecten van mest aanzuren werden geadresseerd, als advies aan de Deense overheid. Aarhus University (DK).
- Bodemkunde. Wageningen Environmental Research (NL).
- Plantenvoeding, grasland, nutriënten. Wageningen Plant Research (NL).

## 2 Mest aanzuren – principes, type zuren en toepassingstechnieken

### 2.1 Mechanisme emissiereductie

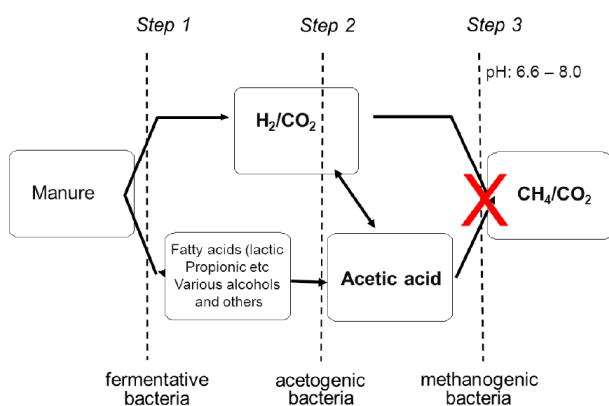
#### 2.1.1 Methaan

Methaan ( $\text{CH}_4$ ) in de mest ontstaat door het afbreken van organische stof (OS) onder anaerobe condities. Daarom is de samenstelling van en de hoeveelheid OS bepalend voor de methaanemissie en daarom zijn ook het voer, het dier en het mestmanagement van invloed. Eventueel strooisel, voerresten en andere elementen kunnen een rol spelen bij de methaanemissie (K. Groenestein et al., 2020). Methaan wordt in de mest geproduceerd door methanogene micro-organismen in anaerobe omstandigheden. De huidige praktijk om mest gedurende langere tijd in mestkelders op te slaan zorgt voor juiste omstandigheden voor deze micro-organismen om zich te vermenigvuldigen en methaan te vormen.

Door het aanzuren van drijfmest worden methanogene micro-organismen geremd in hun activiteit door de lage zuurgraad. Daarnaast kan bij het toevoegen van een anorganisch zuur als zwavelzuur ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) of salpeterzuur ( $\text{HNO}_3$ ) nog een tweede aspect meespelen namelijk het veranderen van de redoxomstandigheden<sup>3</sup> in de mest. Dat betekent dat chemische afbraak van organische stof via sulfaat en nitraat kan plaatsvinden waarbij ook producten als waterstofsulfide en lachgas kunnen ontstaan. Petersen et al. (2012) vonden bij toevoeging van sulfaat en vergelijkbare methaanemissiereductie als bij met zwavelzuur aangezuurde mest. Voor het effect van aanzuren op methanogene populaties zie Ottesen et al., 2009; Peterson et al., 2012; Habtewold et al., 2018; Chen et al., 2019; Ma et al., 2022.

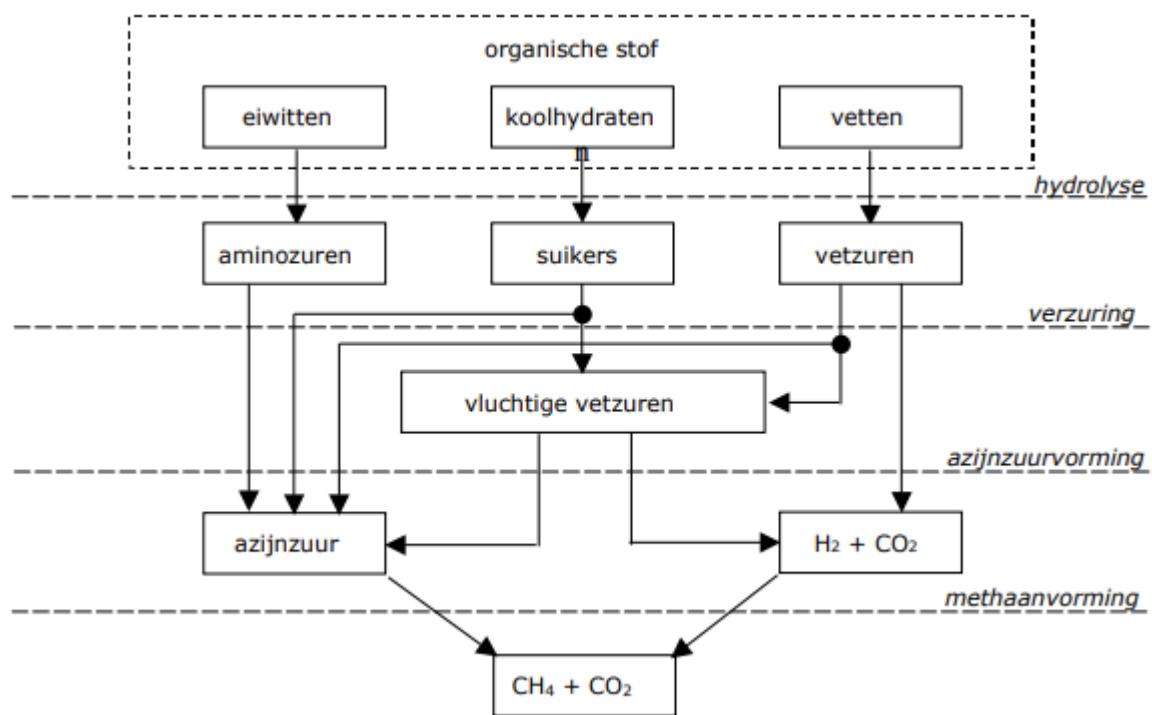
In mestvergisters wordt onder andere gestuurd op een pH van circa 7-8 om een optimale methaanproductie te krijgen. Bij een hoge belasting met veel makkelijk afbreekbaar organisch materiaal ontstaat een ophoping van vetzuren waardoor de pH daalt en daardoor worden de methanogene micro-organismen die deze vetzuren afbreken geremd. Met dalende pH zal ook meer  $\text{CO}_2$  vrijkomt waardoor het biogas van mindere kwaliteit is. In Figuur 1 wordt schematisch de afbraak van organische stof onder anaerobe omstandigheden in een vergister in drie stappen weergegeven (Bussink et al., 2012). Sanders (2001) en Groenestein et al. (2020) beschrijven overigens vier fases, zie Figuur 2.

Bij het bewust aanzuren van de drijfmest in de mestopslag worden de methanogene micro-organismen op eenzelfde manier geremd. Dus door de lage pH zal de emissie van methaan geremd/gereduceerd worden.



**Figuur 1** Versimpelde weergave afbraakprocessen bij mestvergisting (Bussink et al., 2012).

<sup>3</sup> Redoxreactie heeft te maken met de begrippen reductie en oxidatie.



**Figuur 2** Vereenvoudigde schematische weergave van het vergistingsproces (Sanders, 2001).

Petersen et al. (2012) veronderstelden dat het aanzuren van drijfmest met zwavelzuur de methaanemissies tijdens de opslag van drijfmest vermindert - hetzij als gevolg van sulfaataanpassing, hetzij als gevolg van de lage pH, of door een combinatie van deze twee factoren. Met salpeterzuur zouden ook nitraat-reducerende omstandigheden kunnen optreden die remmend werken op methanogene micro-organismen. Aanzuren van mest zorgt ook voor andere microbiologische processen zoals veranderingen in het zuurstofverbruik (Ottosen et al., 2009).

Bij aanzuren tot een pH <6 wordt de populatie van methanogene micro-organismen negatief beïnvloed qua groei en qua activiteit (Habtewold et al., 2018; Ottosen et al., 2009; Petersen et al., 2012). Habtewold et al. (2018) melden dat ook al bij beperkter aanzuren (pH 6,5) reductie van methanogenese optreedt. In het in Denemarken gecommmercialiseerde mest-aanzuursysteem (in de stal) op basis van zwavelzuur (zie hieronder) wordt een pH van 5,5 nagestreefd.

### 2.1.2 Ammoniak

Feces en urine bevatten geen ammoniak. Ammoniak (en kooldioxide) ontstaat als het ureum in de urine wordt omgezet met behulp van het enzym urease dat aanwezig is in de feces en in de biofilm op oppervlakken als een bevuilde vloer.

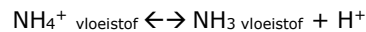
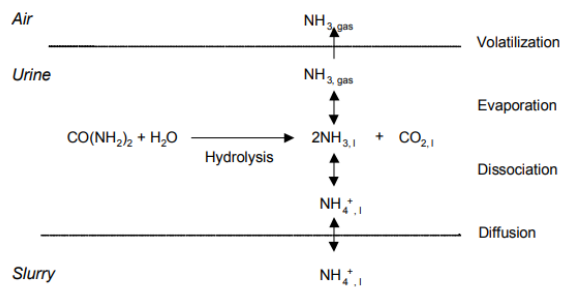


Starmans en Bos (in Puente-Rodríguez & Bos, 2019; blz.14) melden dat

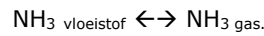
*'De configuratie van het actieve centrum van Urease is afhankelijk van de zuurgraad van het medium. Urease heeft een optimale configuratie bij pH 7.4. De reactiesnelheid hangt sterk af van het microklimaat in de directe nabijheid van het actieve centrum van Urease.'*

*Zowel ammoniak (base) als kooldioxide (zuur) ontwijken bij de omzetting van ureum. Beide stoffen hebben invloed op de pH en dienen daarom meegenomen te worden in beschrijvende modellen. Koeienmest is van nature basisch (pH 8 – 8,5). In die omstandigheden zal ammoniak eerder vervluchtigen dan kooldioxide.'*

De zuurgraad beïnvloedt ook het evenwicht tussen ammonium en ammoniak. Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) is een geconjugeerd zuur van ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) dat ontstaat na afbraak van ureum. Ammonium is in evenwicht met ammonia ( $\text{NH}_3$  vloeistof) volgens de reactie (Groenestein, 2006; Monteny, 2000):



Ammoniak ( $\text{NH}_3$  gas) ontsnapt vervolgens aan een oplossing met ammonia ( $\text{NH}_3$  vloeistof) totdat zich een tweede evenwicht heeft ingesteld:



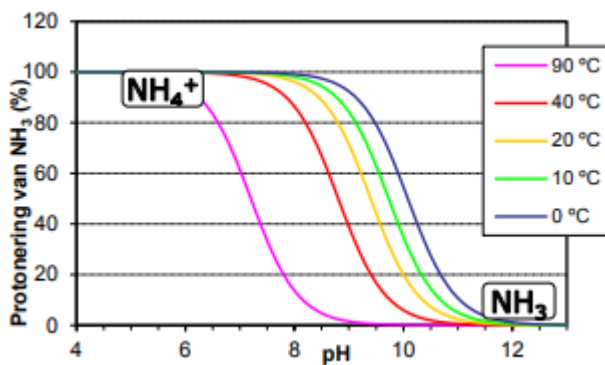
Dit tweede evenwicht (van ammoniak als vloeistof en gas) is afhankelijk van de diffusiesnelheid.

De vorming van  $\text{NH}_3$  (vloeistof) via het eerste evenwicht is pH afhankelijk. Hoe zuurder de vloeistof

hoe meer het evenwicht naar  $\text{NH}_4^+$  gaat en hoe lager de concentratie  $\text{NH}_3$ . Bij een pH < 5,5 is de ammoniakemissie uit de mest bijna nul (Bussink et al., 2012). Het betreft hier dus een puur chemisch proces (evenwicht). De zuursterkte van het ammonium-ion is  $5,8 \cdot 10^{-10}$ . Het is een zwak zuur, wat betekent dat als een zuur wordt toegevoegd dat sterker is dan ammonium het proton ( $\text{H}^+$ ) naar het zwakkere zuur zal gaan. Een sterk zuur laat het proton namelijk makkelijk los en een zwak zuur niet.

Het gebruik van meerwaardige zuren kan gunstig zijn voor de hoeveelheid zuur die moet worden toegevoegd. Dat is voor een tweewaardig zuur<sup>4</sup> als zwavelzuur ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) de helft van een eenwaardig zuur als salpeterzuur ( $\text{HNO}_3$ ) (zie hieronder hoofdstuk 2 en 3).

Figuur 3 geeft de invloed weer van pH (en temperatuur) op de protonering van ammoniak.



**Figuur 3** Protonering van ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) tot ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) bij verschillende temperatuur. Bron: Starmans en BINAS in (Puente-Rodríguez & Bos, 2019, blz. 14).

Een bijkomend voordeel van het aanzuren van mest is dat er meer beschikbare stikstof opgelost is in de vloeibare fase van de mest bij pH 5,5. Dit verhoogt de bemestende waarde bij aanwending.

## 2.2 Type zuren & emissiereductie potentie

Er zijn een aantal categorieën zuur te onderscheiden die gebruikt kunnen worden om drijfmest aan te zuren.

### 2.2.1 Anorganische zuren

Anorganische zuren zijn afgeleid van een anorganische verbinding (organische verbindingen bevatten in ieder geval één koolstofatoom). Er zijn meerdere anorganische zuren die geschikt kunnen zijn om de pH van mest tussen 6,5 - 5,5 te krijgen, onder andere zwavelzuur ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), salpeterzuur ( $\text{HNO}_3$ ), zoutzuur ( $\text{HCl}$ ) en fosforzuur ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ). Belangrijk voor de (methaan- en) ammoniakemissie is dat de zuren voldoende sterk zijn zodat de  $\text{H}^+$  naar het ammonium gaat en de pH tot onder 5,5 verlaagd kan worden. Als het zuur niet sterk is,

<sup>4</sup> Een meerwaardig zuur is een zuur met meerdere waterstofionen per zuurrest.

zal de Ph moeilijk dalen omdat het bufferend vermogen van de mest is hoog). Dit betekent ook dat zuur niet eenmalig kan worden toegevoegd, maar toegevoegd moet blijven worden.

Bij onderzoeken naar mest aanzuren zijn vooral de anorganische zuren zwavelzuur en salpeterzuur gebruikt, maar dat wil niet zeggen dat andere anorganische zuren niet toe te passen zijn. Het effect op de emissies hangt af van de Ph die wordt bereikt, en dus ook van de hoeveelheid zuur die toegevoegd wordt, evenals van de toevoegingsmethode.

Fangueiro et al. (2015) keken in een literatuurstudie naar de effecten van verschillende zuren op gasvormige emissies uit dierlijke mest en vonden dat aanzuren van mest op het primaire bedrijf de ammoniakemissie verminderde met 37% bij gebruik van salpeterzuur en met 50-70% in het geval van zwavelzuur. Ze wijzen verder op de verschillende mitigerende effecten die zijn beschreven wanneer het zuur wordt toegepast op de mest tijdens de opslag (27-98% ammoniakemissiereductie) of veldistributie (15-80% reductie) en afhankelijk van het type drijfmest en de beoogde pH. Wanneer we aannemen dat in traditionele melkveestallen 40% van de stalemissie van ammoniak uit de mestkelders komt en dus rond 60% op het vloeroppervlak, zal aanzuren van mest in de kelders tot een pH < 6 en dus in theorie een reductie onder 39%.

**Tabel 1** Additieven en pH-doelstelling (Fangueiro et al., 2015; en referenties daarin).

Additives used for slurry acidification and target pH.

Additive	pH	Slurry	References
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5.5	Pig	Jensen, 2002, Infarm A/S, 2014a, b
	—	Pig	Kai et al., 2008
	6.4	Pig	Biocover A/S, 2012; Nyord et al., 2013
	—	Pig	Nyord et al., 2013
	6.8	Pig	Nyord et al., 2013
	6.2	Pig	Sørensen and Eriksen, 2009, Nyord et al., 2013
	5.5	Pig	Infarm A/S, 2014a, 2014b
	6.0	Cattle	Sørensen and Eriksen, 2009
	6.4	Cattle	Biocover A/S, 2012
HCl	5.3	Pig	Panetta et al., 2005
HCl	4.5	Cattle	Eriksen et al., 2012, Petersen et al., 2012
HNO <sub>3</sub>	5.8	Cattle	Husted et al., 1991
	6.7	Cattle	Vandre and Clemens, 1997
	6.0	Cattle	Stevens et al., 1992; Velthof and Oenema, 1993; Stevens et al., 1995
HNO <sub>3</sub>	4.5	Cattle	Velthof and Oenema, 1993
Saccharose	5.8–6.5	Pig	Berg and Pazsiczki, 2006
Lactic acid	5.5–6.0	Pig	Berg et al., 2006; Berg and Pazsiczki, 2006
Superphosphate	—	Cattle	Safley et al., 1983; Husted et al., 1991
Superphosphate	5.5	Composted Pig slurry	Tran et al., 2011
Aluminum chloride		Pig and Poultry	Smith et al., 2001; Choi, 2004; Smith et al., 2004; Nahm, 2005
Aluminum sulfate		Pig, Poultry, Dairy	Kithome et al., 1999; Moore et al., 1999; Moore et al., 2000; Lefcourt and Meisinger, 2001; Shi et al., 2001; Sims and Luka-McCafferty, 2002; Armstrong et al., 2003; Nahm, 2005; Li et al., 2006
Calcium/magnesium carbonate	6.3–6.4	Poultry	Witter and Kirchmann, 1989; Nahm, 2005
Glucose	—	Cattle	Clemens et al., 2002
Elemental sulfur		Poultry	Mahimairaja et al., 1994

---

Het effect van aanzuren op de methaanemissie uit mest is ook groot. Deze maatregel heeft echter geen effect op de enterische methaanemissie. Zo meldt Petersen et al. (2014) een methaanemissiereductie uit varkensmest van 99% bij aanzuren met zwavelzuur in de stal en van 94% bij aanzuren in opslagen. In opgeslagen rundermest werd de CH<sub>4</sub>-emissie met ~72% verminderd door zoutzuur in het geval van verse drijfmest (Petersen et al., 2012), en respectievelijk 72% door zwavelzuur (Sommer et al., 2017), 75% door salpeterzuur (Berg et al., 2006) en 78% door zoutzuur in het geval van langer opgeslagen slurry (Petersen et al., 2012).

### 2.2.2 Organische zuren

Organische zuren zijn afgeleid van een organische verbinding die in ieder geval één koolstofatoom bevat en een H atoom. Er zijn meerdere organische zuren die gebruikt kunnen worden. Bijvoorbeeld: azijnzuur (CH<sub>3</sub>-COOH), citroenzuur (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>), melkzuur (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>), propionzuur (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>), maleïnezuur (C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>4</sub>), en glutaarzuur (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>O<sub>4</sub>) (Fangueiro et al., 2015).

Berg et al. (2006) constateerden een methaanemissiereductie van 90% door het gebruik van melkzuur in een pottenproef.

Fuchs et al. (2021) vonden een verbeterd effect op gasemissiereductie door mest aanzuren door zwavelzuur te vervangen door azijnzuur (acetaat). Aan het einde van twee experimenten had zwavelzuur de cumulatieve ammoniakemissie verminderd met 75%, maar azijnzuur met 83%. Azijnzuur elimineerde bovendien de methaanemissie bijna volledig, terwijl zwavelzuur de methaanemissie met 89% verminderde. Verder leidde aanzuren met azijnzuur ook tot lagere geuremissie in vergelijking met zwavelzuur. Op basis van het tweede experiment raden deze onderzoekers aan om tijdens de eerste dagen van verzuring een hoog percentage azijnzuur te gebruiken en vervolgens een mengsel met ten minste 50% azijnzuur, om een grote emissiereductie te bereiken met een lagere uitstoot van zwavelverbindingen in vergelijking met alleen zwavelzuur.

In een recente studie (Im et al., 2021) werd citroenzuur als alternatief voor zwavelzuur gebruikt voor het verminderen van broeikasgasemissies uit de mest. Dit werd uitgevoerd op laboratoriumschaal bij verschillende doseringen (pH 5,0-7,0), en vervolgens bevestigd in een opslagtank op pilotschaal, met een effectief volume van 30 ton. Tot een pH ≥ 6,5 was de reductie verwaarloosbaar, terwijl bij een pH ≤ 6,0 de emissies van CH<sub>4</sub> met 85-99% en van H<sub>2</sub>S met 48-72% werden gereduceerd (ibid.). Ondanks de CO<sub>2</sub>-voetafdruk voor de productie van citroenzuur, werd berekend dat een broeikasgasreductie (BKG) van 107 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton varkensmest kon worden bereikt door aanzuren met citroenzuur (Im et al., 2021).

Pyrolysevloeistoffen worden in de literatuur als kansrijk gezien om de pH van mest te verlagen.

Pyrolysevloeistoffen komen als bijproducten vrij bij thermochemische omzetting van verschillende vormen van biomassa in gas voor energie en in koolstof (zoals biochar) voor verschillende doeleinden.

Pyrolysevloeistoffen zijn waterige oplossingen die een breed scala aan organische verbindingen bevatten, met azijnzuur als meest voorkomende, gevolgd door methanol, hydroxyaceton, mierenzuur, furfural en propaanzuur in een volgorde die varieert afhankelijk van het uitgangsmateriaal en de procestechnologie (Hagner et al., 2021). In een studie werd een ammoniakemissiereductie van circa 99% bereikt met aanzuren met pyrolysevloeistoffen op het moment van uitrijden van rundermest, even groot als het effect van zwavelzuur (ibid.). Hagner et al. (2020) geven wel aan dat er enkele schadelijke componenten in de pyrolysevloeistof (bijvoorbeeld fenolen en PAKs) aanwezig zijn en dat er vele malen meer vloeistof moet worden bijgemixt ten opzichte van zwavelzuur om eenzelfde pH-daling te krijgen. Het aanzuren met dit product is dus wel mogelijk maar de beschikbaarheid van het product, borging van de kwaliteit (mogelijke bodem-verontreinigende stoffen) en status (mogelijk afval) geven onzekerheden in het gebruik. Gronwald et al. (2018) vonden overigens geen of slechts een marginaal effect bij de toevoeging van pyrochar of hydrochar aan mest in een laboratoriumexperiment.

Organische zuren kunnen ook in de mest zelf geproduceerd worden door het toevoegen van micro-organismen. Deze micro-organismen kunnen fermenteerbare koolhydraten in azijnzuur en melkzuur omzetten. Dit wordt biologisch aanzuren genoemd. Bij biologisch aanzuren worden in meer of mindere mate middelen toegevoegd zoals melasse of zetmeel (d.w.z. gemakkelijk afbreekbare koolstofbronnen als

energiebron voor de micro-organismen, of melkzuurbacteriën (Melse et al., 2015). Kavanagh et al. (2020) hebben een scala aan organische producten toegevoegd aan de drijfmest om de pH biologisch te verlagen en daarmee de emissies te reduceren. Het betrof hier afval van de voedingsmiddelenindustrie, bijvoorbeeld melkresten, bierborstel, mais- en grassilage, melasse. Daarbij testen ze ook een aantal commerciële toevoegmiddelen. Alleen de toevoeging van melasse 5% leidde tot een zodanige pH verlaging dat de emissie van ammoniak daadwerkelijk verlaagd werd (ibid.). Methaanemissies nemen in de meeste gevallen toe omdat er enerzijds onvoldoende pH-verlaging optreedt voor de methanogenese en er anderzijds makkelijk afbreekbare organische stof wordt toegevoegd (Bussink et al., 2014; Melse et al., 2015 ; Kavanagh et al., 2020).

## 2.3 Toepassingstechnieken van mest aanzuren

Er zijn verschillende manieren en momenten om mest of fracties hiervan aan te zuren om emissies te reduceren. Hieronder worden een aantal daarvan toegelicht.

### 2.3.1 Aanzuren van drijfmest bij aanwenden

Aangezuurde mest zorgt voor een lagere ammoniakemissie bij het uitrijden. Het aanzuren zelf kan al in de opslag plaatsvinden, maar kan ook gebeuren op het moment van uitrijden. Als het aanzuren van mest gedaan wordt in een kelder in de stal (pH 5,5) levert dat zowel emissiereductie van ammoniak op in de stal als bij aanwenden, zolang bij uitrijden de zuurgraad onder pH 6 – 6,5 kan worden gehouden. Aanzuren bij aanwenden geeft geen effect op methaanemissie. In vergelijking met de stalemissies en enterische emissies van methaan zijn die bij aanwenden namelijk verwaarloosbaar (Petersen et al., 2013). Ook als aangezuurd wordt op het moment van uitrijden wordt alleen de reductie van de ammoniakemissie bij aanwenden gerealiseerd. Stalemissies van ammoniak en methaan blijven gelijk. Een voordeel van aanzuren bij aanwenden is dat er minder zuur toegevoegd hoeft te worden dan bij het aanzuren van drijfmest in de stal. In de stal gaat het bijvoorbeeld om circa 6 kg zwavelzuur per m<sup>3</sup> drijfmest (Melse et al., 2015) tegen 2,5 kg zwavelzuur per m<sup>3</sup> bij aanwenden<sup>5</sup>. Nieuwe inzichten van onderzoekers in Denenmarken zijn dat er in de stal rond 12 kg zwavelzuur per ton varkensmest nodig is en rond 6 kg per ton melkveemest om een pH van 5,5 te bereiken (persoonlijke communicatie, september 2021). Uiteraard is de hoeveelheid zuur per eenheid mest afhankelijk van het type mest (zoals gehalte aan organische stof en carbonaat) en type zuur (Fangueiro et al., 2015; Seidel et al., 2017; Wagner et al., 2021) die worden gebruikt.



**Figuur 4** Commercieel beschikbare systeem om mest aan te zuren bij aanwending (SyreN, 2020).

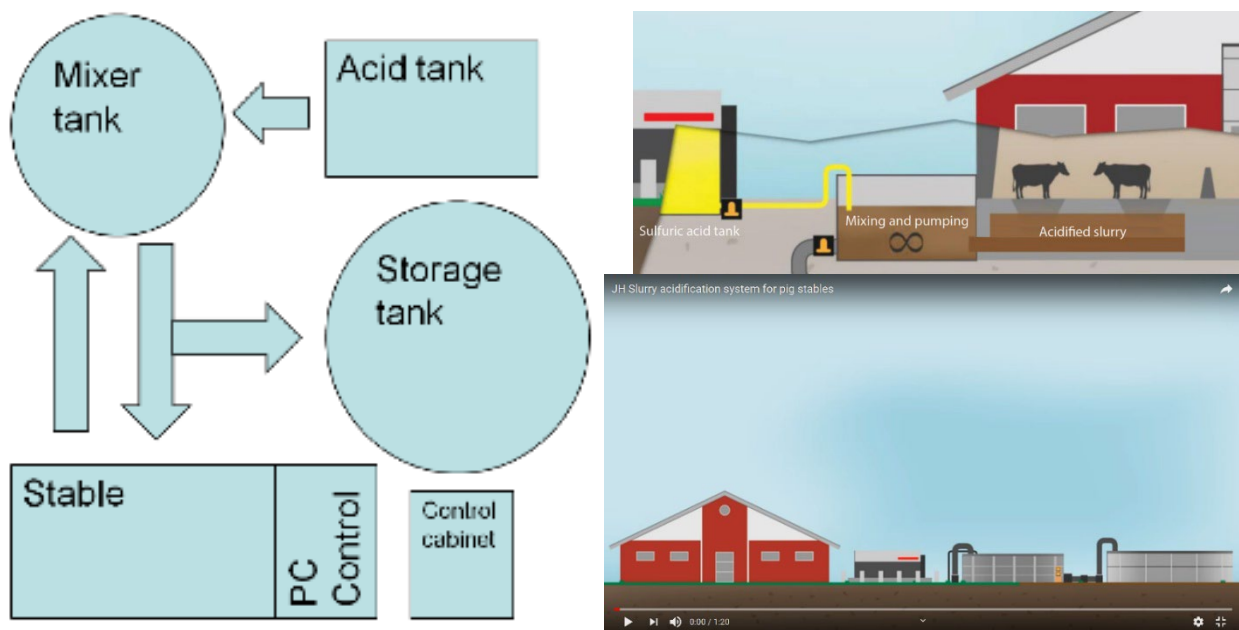
<sup>5</sup> Brochure SyreN, Stabilisation of slurry (2019)

Op basis van experimenten met een sleepvoetmachine in Nederland melden Huijsmans et al. (Huijsmans et al., 2015) een gemiddelde emissiereductie over alle proeven (onafhankelijk van tijdsduur proef) van 7% bij 2 liter zwavelzuur per m<sup>3</sup> rundermest van een gangbaar melkveebedrijf en 24% bij 4 liter per m<sup>3</sup> mest ten opzichte van niet aangezuurde mest. Dat is een stuk lager dan in Denemarken, waar gerekend wordt met een reductie van 49 % (Vera statement 2012)<sup>6</sup>. Recent onderzoek claimt in een vergelijking met het gebruik van sleepslangen door inmenging van aangezuurde drijfmest zelfs een reductie van de ammoniakemissie van 89% en 96% reductie bij aangezuurde drijfmest met gesloten slotinjectie, terwijl niet aangezuurde mest de uitstoot met 60% verminderde (Wagner et al., 2021).

### 2.3.2 Aanzuren van drijfmest in de directe nabijheid van de stal

In Denemarken is het systeem om drijfmest aan te zuren in melkvee- en varkenstallen erkend als emissie-reducerende maatregel. Het systeem (JH Acidification NH4+) is gecommmercialiseerd door JH/Agro en dit bedrijf gebruikt zwavelzuur voor het aanzuren. In theorie zouden ook andere zuren voor het aanzuren bij dit of een vergelijkbaar systeem gebruikt kunnen worden, zowel anorganische als organische.

In het Deense systeem wordt drijfmest met zwavelzuur gemixt. Dit gebeurt buiten de stal vanwege de eventuele toxische gasen die tijdens het mixen kunnen ontstaan (zoals H<sub>2</sub>S). Figuur 5 geeft een gesimplificeerde schematische weergave. In een mix-tank wordt zuur toegevoegd totdat de beoogde pH is bereikt. Een deel van deze aangezuurde mest wordt weer teruggepompt naar de mestkelder om de pH van de verse mest te verlagen en de ammoniakemissies vanuit de mestkelder te voorkomen. De mest in de mestput dient regelmatig gemixt te worden om de pH gelijkmatig over de hele mestkelder te verlagen. Het grootste deel van de mest wordt echter buiten de stal opgeslagen in een mestsilo. Het systeem is geautomatiseerd. De zuurgraad wordt bijvoorbeeld constant gemonitord en de toevoeging van zuur gestuurd door middel van pH meters.



**Figuur 5** Schematische weergave aanzuur systeem JH Acidification. Schema links uit (Andersen, 2013). Schema rechts <http://jhagro.com/jh-nh4-slurry-treatment/> (geraadpleegd augustus 2020).

Deze methode werkt op basis van zwavelzuur, maar ook andere zuren zouden gebruikt kunnen worden. De hoeveelheden toe te voegen (an- of organische) zuur zullen afhangen van de concentratie en zuiverheid van het zuur, de waardigheid van het zuur en de zuursterkte, en van het type en eigenschappen van de mest (Fangueiro et al., 2015). Drijfmest heeft een hoge buffercapaciteit onder andere door de aanwezigheid van

<sup>6</sup> VERA-Statement001\_SyreN.pdf (vera-verification.eu) (geraadpleegd maart 2022).

CO<sub>2</sub>/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> en NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NH<sub>3</sub> en CaCO<sub>3</sub> (Bussink et al., 2014). Dit betekent dat relatief veel zuur moet worden toegevoegd en dat zich na toevoeging een nieuw evenwicht instelt wat enige tijd kan blijven, daarna gaat de pH weer omhoog. Daarbij zijn andere factoren zoals temperatuur en mestsamenvatting ook van belang. In Tabel 2 worden doseringen van zwavelzuur en het effect op pH weergegeven.

Door middel van het aanzuren van drijfmest tot een pH <6 kan een reductie van de methaanemissie van 65% à 90% (van de emissie uit mest) bereikt worden (Petersen et al., 2012; Petersen et al., 2014; Sommer et al., 2017; Kasper et al., 2022). Recenter onderzoek (Habtewold, 2018) met zwavelzuur (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) bevestigt een 69-84% methaanemissie reductie.

Het daadwerkelijke effect van de maatregel 'mest aanzuren' wordt ook bepaald door hoe het is geïmplementeerd in het huisvesting- en mestmanagement-systeem. Onder Deense omstandigheden en volgens de leverancier kan de stalemissie van ammoniak in een melkveestal verlaagd worden met circa 50%<sup>7</sup>. De belangrijkste bron van de ammoniakemissie in deze stallen ontstaat echter op de vloer, experts geven daarom aan dat op grond van recenter onderzoek de verwachting is dat het reductiepercentage zal worden verlaagd naar ongeveer 30% (persoonlijke communicatie september 2021; Kasper et al., 2022). Voor de varkenshouderij wordt een 64% ammoniakemissiereductie volgens een VERA-statement bereikt.

Dit systeem is gestandaardiseerd en gecommmercialiseerd in Denemarken en dus zou praktisch gesproken relatief snel in Nederland geïmplementeerd kunnen worden. Wel moet een varkens- en/of melkveebedrijf voldoende ruimte op het erf hebben voor de mix-tank en de opslagen. Daarbij zou uiteraard ook een emissiefactor voor ammoniak moeten worden vastgesteld om dit systeem op de Rav-lijst op te nemen. Daarnaast moeten echter ook een aantal ecologische (bodem en water) vraagstukken worden beantwoord - zie Hoofdstuk 4.

**Tabel 2** Zuurdoseringen van 96% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (kg/t mest) en pH van de mest voor en na aanzuren (mesttank-onderzoek) (Adamsen et al., 2021).

	Cattle 1	Pig 1	Pig 2	Cattle 2
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	6.6	14.5	16.7	7.2
pH before	7.0	7.4	7.5	6.7
pH after <sup>1</sup>	5.0	5.0	4.9	5.0

<sup>1</sup>pH was measured immediately after the acidification.

### 2.3.3 Plasmatechnologie

Plasmatechnologie wordt gezien als een milieuvriendelijk alternatief voor oppervlaktereinigingsmethoden met chemische oplosmiddelen (Tessier, 2013). Ook wordt deze technologie toegepast om voorwerpen te reinigen en te beschermen. Daarnaast wordt het ook toegepast voor de binding van stikstof (denk aan ammoniak) en CO<sub>2</sub>, maar ook voor de binding van methaan. Li et al. (2018) maakten onlangs een review van deze technieken en toepassingen. Ze positioneren dit onderzoeksveld als alternatief voor de N-fixatie d.m.v. het Haber-Bosch (H-B) proces, dat onder andere gebruikt wordt om N-kunstmest te produceren. Het H-B is een zeer energie-intensief proces, waarbij sommige inschattingen ervan uit gaan dat het 1% van het totale wereldwijde energiegebruik beslaat en goed is voor 1,4% van de wereldwijde uitstoot van CO<sub>2</sub> (Capdevila-Cortada, 2019). Om op industriële schaal met dit H-B proces te kunnen concurreren, noemen ze energie-efficiëntie als de belangrijkste focus van het plasmaonderzoek. Zo hebben onderzoekers van de TU/e in samenwerking met andere partners recent een plasmareactor ontwikkeld om N-kunstmest te maken m.b.v. zonlicht, water en lucht, en met lage kosten, speciaal bedoeld voor ontwikkelingslanden.<sup>8</sup>

<sup>7</sup> Why choose JH Acidification NH<sub>4</sub><sup>+</sup> system for cattle ? (jhagro.com) (geraadpleegd maart 2022).

<sup>8</sup> Researchers at TU/e have developed a plasma-powered mini-plant that produces cheap fertilizer using only sun, water and air. (tue.nl) (geraadpleegd maart 2022).

Plasmatechnologie vindt daarnaast al haar weg naar de veehouderijpraktijk om emissies te reduceren. N2 Applied<sup>9</sup> is een Noors bedrijf dat een nieuwe plasmatechnologie ontwikkelt om stikstof uit de lucht te halen en dit te mixen met drijfmest. Het bedrijf claimt dat daarmee de ammoniak- en methaanemissies uit mest sterk worden gereduceerd (tot zelfs 100%) en die extra stikstof (in de vorm van nitraat) tegelijk goed kan worden benut als meststof (persoonlijke communicatie, juli 2020). Via een elektrisch proces wordt stikstof en zuurstof uit de lucht gehaald en omgezet naar stikstofoxiden. Vervolgens worden de stikstofoxiden in de drijfmest, dunne fractie of digestaat opgenomen en gecombineerd met vrije ammoniak en ammoniumnitraat. De stikstofoxiden vormen de basis voor salpeterzuur dat de pH van de mest (drijfmest, fracties of digestaat) verlaagt. Het resultaat kan zijn dat ammoniak wordt omgezet in een stabiele ammoniumnitraat meststof<sup>10</sup>, een 'stikstof verrijkte organische meststof' ('nitrogen enriched organic fertiliser – NEO'). De ammoniakemissie vanuit de mest zal dus worden gereduceerd. Het bedrijf voert momenteel testen uit op verschillende locaties (melkvee en varkens) in West-Europa, bijv. in Noorwegen en in samenwerking met Arla in de UK.<sup>11</sup> Het bedrijf voert ook een project uit bij Van Den Borne Aardappelen in Reusel, Nederland. De intentie is om mest die op dat bedrijf wordt gebruikt met een N2 Applied unit te behandelen voorafgaand aan toediening om een N-rijke mest te genereren. Momenteel wordt de haalbaarheid onderzocht van dit systeem voor de Nederlandse context in het kader van de Klimaatenvolop.

#### 2.3.4 Aanzuren van het inoculum

Sokolov et al. (2020a; 2020b) voerden onderzoek uit naar het effect van het aanzuren van het restant aan mest dat na het uitpompen van mest uit de kelders achterblijft. Dit restant wordt het 'inoculum' genoemd, omdat het een startpopulatie bevat van methanogene micro-organismen. Deze micro-organismen vermenigvuldigen zich relatief langzaam, zodat het wegnemen van de startpopulatie een betekenisvol effect kan hebben op de methanogenese in de periode dat de mestput gevuld wordt en is. Er werden laboratoriumexperimenten en grootschaliger proeven gedaan op basis waarvan geconcludeerd werd dat deze methode een reducerend effect heeft op de methaanemissies vergelijkbaar met het aanzuren van de gehele drijfmestmassa. Bij de grootschaligere proeven werden mestopslagen met een inhoud van 10,6 m<sup>3</sup> gebruikt waarin inocula (mest van 1 jaar oud) aangevuld werd met verse mest (verhouding 1:4) (Sokolov et al., 2020a). Het inoculum in de ene tank was niet aangezuurd, in een andere was dit 1 jaar geleden aangezuurd en in een derde was het aangezuurd voorafgaand aan het vullen van de tank. Hierbij werd in totaal 1,1 liter 70% zwavelzuur toegediend (circa 1,2 kg zwavelzuur). Dit is beduidend minder dan de toevoeging van 6 kg/m<sup>3</sup> waarvan uitgegaan wordt bij het aanzuren van alle mest in de mestkelder. Bij deze proefopstelling werd een methaan reductie van 77 % gemeten bij toediening van het zuur aan het inoculum net voor het vullen van de mestopslag en een ammoniak reductie van 33%. Gebruik van inoculum dat een jaar geleden was aangezuurd leidde tot een reductie van de methaanemissie van 38% en van ammoniak van 23%. N<sub>2</sub>O-emissie werd respectievelijk met 73% en 50% gereduceerd. Na 150 dagen meten was de pH in de controle en de tank met het een jaar daarvoor aangezuurde inoculum 8,2 en in de tank met het voorafgaand voor vullen aangezuurde inoculum circa 7,6. Dit onderzoek (Sokolov et al., 2020a) geeft de verwachting dat deze manier van aanzuren een langduriger effect op methaanemissie heeft. Voor ammoniak was het reducerende effect lager door het aanzuren van het inoculum vergelijken met het aanzuren van de gehele mestmassa. In Nederland wordt de meeste mest momenteel opgeslagen in de stal onder de roosters. Dan komt continu verse mest in de opslag en verwacht wordt dat de ammoniakemissies hoger zullen zijn dan in deze proeven zijn vastgesteld (hogere pH en hogere concentratie aan ammoniak in contactoppervlak).

#### 2.3.5 Aanzuren van de dunne fractie

Het scheiden van urine/gier/dunne fracties en feces/dikke fractie (bij de bron of achteraf) is een van de ammoniakemissie reducerende maatregelen die toegepast kunnen worden. Miranda et al. (2021) hebben een 'Life cycle assessment' (LCA) studie uitgevoerd naar het aanzuren van de dunne fractie van verse runderdrijfmest met zwavelzuur en biochar. Uit deze studie bleek dat de milieuprestatie van de onbehandelde dunne fractie het slechtste was. Zwavelzuur vertoonde de hoogste efficiëntie bij het verminderen van emissies in vergelijking met de andere behandelingen, waarbij de ammoniak- en methaanemissies respectievelijk met 61% en 98% werden verminderd in vergelijking met de biochar-

<sup>9</sup> TECHNOLOGY - N2 Applied (geraadpleegd maart 2022).

<sup>10</sup> N2 Applied - NEEC (geraadpleegd maart 2022).

<sup>11</sup> Arla launches UK Innovation Farm and announces latest research trial ([arlafoods.co.uk](http://arlafoods.co.uk)) (geraadpleegd maart 2022).

---

toevoeging (ibid.). De emissiemetingen in deze LCA-studie werden uitgevoerd onder laboratoriumomstandigheden, validatie op praktijkomstandigheden is noodzakelijk. Verwacht wordt dat er lagere hoeveelheden zuur toegevoegd hoeven te worden vanwege de lagere buffercapaciteit van dunne fracties. Een nadeel is dat de dikke fractie niet wordt behandeld. Dit kan betekenen dat een aanvullende maatregel moet worden geïmplementeerd om de methaanemissie uit deze fractie te kunnen reduceren.

### 2.3.6 Aanzuren van de mestoppervlakte

Een onderzoek met een beperkte volume mest toonde aan dat bij het alleen aanzuren van de oppervlakte van de mest met zwavelzuur de ammoniakemissie de eerste dagen met 98% en na 38 dagen met 22% verminderd zou kunnen worden, met kleine effecten op lachgas- en methaanemissies (Zhang et al., 2021). Als maatregel om de ammoniakemissie te verlagen biedt dit idee (oppervlakte-aanzuring) mogelijkheden omdat voor ammoniakemissies de omstandigheden bij het contactoppervlak leidend zijn.

### 2.3.7 Aanzuren van de vloeroppervlakte

Een andere mogelijkheid om de ammoniakemissie in een stal te reduceren is het aanzuren van de mest op de vloer en van de vloeroppervlak. Technisch is dit niet moeilijk toe te passen. Er zijn systemen ontwikkeld voor het spoelen van de vloeren. Momenteel wordt al water door een aantal mestrobots of schrapers gespreid om mest-verwijdering te verbeteren.

Door het aanzuren van het oppervlak van de vloer kan (behalve de evenwichtsverschuiving van  $\text{NH}_3$  naar  $\text{NH}_4^+$  ook) de urease-activiteit geremd worden. Urease is het enzym dat zorgt voor de omzetting van ureum in de urine naar ammoniak. Bacteriën die urease produceren leven o.a. in de mest en in de biofilm op de stalvloeren (zie Sectie 2.1.2). In een onderzoek werden een aantal zuren en ontsmettingsmiddelen op melkveebedrijven getest op hun effect op de urease activiteit op verschillende vloeren. Er werden testen uitgevoerd met een zoutzuuroplossing (HCl) en per-azijnzuur ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_3$ ). Ook werden formaldehyde en geëlektrolyseerd water (EOW) getest vanwege hun biocide eigenschappen (Aarnink et al. in Puente-Rodríguez & Bos, 2019; blz. 106-126). Vanwege de verrassend (effectiviteit en langdurige) effecten van EOW zijn de rechten van deze toepassing met een internationaal octrooi beschermd (Aarnink & Puente-Rodríguez, 2017). Er werd nauwelijks een effecten gezien van de zoutzuuroplossing in vergelijking met de basisbehandeling, d.w.z. spoelen met water. Dit werd vooral veroorzaakt doordat het zoutzuur in een zeer geringe dosis werd toegevoegd aan het water om corrosie van de betonnen roostervloeren te voorkomen. Per-azijnzuur was volgens verwachting zeer efficiënt in het neutraliseren van de urease activiteit op betonvloeren. Dit middel is echter niet verder onderzocht vanwege de risico's voor de dieren. In principe is het dus wel mogelijk om met een vloer behandeling met zuur de ammoniakemissie vanaf het vloeroppervlak te verlagen.

### 2.3.8 pH van de urine verlagen via het voer

In plaats van de mest zelf aan te zuren kan ook de pH van mest (feces en urine) beïnvloed worden via voer of voeradditieven. Bij vleesvarkens is bekend dat het toevoegen van benzoëzuur leidt tot zuurdere urine, de pH wordt met één eenheid verlaagd en daarmee wordt de ammoniakemissie gereduceerd<sup>12</sup> (Aarnink et al., 2008). Verwacht wordt dat dit niet mogelijk is bij runderen omdat benzoëzuur in de pens wordt afgebroken. Stelwagen et al. (2000) onderzochten de balans tussen kationen en anionen bij droogstaande koeien in verband met melkziekte. Door de hoeveelheid anionen te verhogen in het voer ging de pH van de urine van circa 8 naar circa 6,5. Er is dus in principe wel een mogelijkheid om de pH van de urine te verlagen door middel van het rantsoen. De vraag is of dit voldoende zal zijn om melkveedrijfmest op een betekenisvol lage zuurgraad te krijgen.

---

<sup>12</sup> aav\_2012\_04\_doc.pdf (geraadpleegd maart 2022).

---

## 3 Aandachtspunten van mest aanzuren

### 3.1 Ecologische (bodembkundig/landbouwkundige) aspecten

#### 3.1.1 Zwavelzuur

In de jaren negentig zijn een aantal onderzoeken uitgevoerd naar het aanzuren van drijfmest in Nederland (Verboon & van Lent, 1990; van Westreenen et al., 1992; Hendriks et al., 1993; van Lent, 1993). De resultaten van deze studies lieten een duidelijke afname van de ammoniakemissie uit de stal zien. Methaan was echter indertijd nog geen punt van aandacht.

Een van de belangrijkste argumenten voor het niet verder werken aan het implementeren van deze maatregel in Nederland betrof de mogelijk negatieve effecten op ecosystemen. Die hadden vooral te maken met het gebruik van zwavelzuur, dat het meest gebruikte zuur is in de experimenten (literatuur) en in commerciële uitvoeringen vanwege de lage kosten (zie Paragraaf 3.2).

Zwavel (S) komt vaak in de natuur voor, zowel in organische als anorganische verbindingen. Zwavel is een belangrijk element in de voeding van mensen en andere dieren, planten en micro-organismen. Sinds het begin van de industrialisatie in de 19<sup>e</sup> eeuw steeg de uitstoot van zwaveldioxide (SO<sub>2</sub>) door het verbranden van o.a. steenkool. Het was daardoor ook lange tijd overbodig om zwavel aan meststoffen toe te voegen omdat er via depositie al meer dan genoeg werd aangevoerd (Schils, 2016). In de jaren zeventig werd onderkend dat zwaveldepositie schadelijk is voor het milieu, met name door verzuring van bodems en zoetwaterecosystemen. Sinds de jaren tachtig is de depositie in Nederland sterk gedaald, waardoor inmiddels voor sommige gewassen op sommige gronden sprake is van een zwavel-tekort (ibid.).

In 2014 inventariseerde de Commissie Deskundigen Meststoffenwet (CDM) op verzoek van het Ministerie van Economische Zaken de risico's van mogelijk gebruik van zwavelhoudende (mest)stoffen voor bemesting in de landbouw, met name mest aangezuurd met zwavelzuur (CDM, 2014). Het advies was om (hier letterlijk overgenomen):

- 'Meer voorlichting te geven over landbouwkundige en milieukundige aspecten van het gebruik van zwavelhoudende afval- of reststoffen in de landbouw.
- Versterkt in te zetten op andere opties dan het aanzuren van mest met zwavelzuur voor de beperking van ammoniakemissie.
- In te zetten op een aangepast bodembeheer met andere meststoffen dan gips voor het verbeteren van de bodemstructuur.
- Regelgeving in te voeren gebaseerd op maximale zwavelgiften indien aanzuren van mest als emissiearme techniek wordt aangewezen.
- Het regelmatig evalueren van trends van sulfaatconcentraties in grond- en oppervlaktewater en van het gebruik van zwavelhoudende meststoffen in de landbouw.'

Er werd derhalve geadviseerd om zorgvuldig om te gaan met zwavel en daarom zo mogelijk andere opties voor het beperken van de ammoniakemissie in de veehouderij te implementeren. Mocht aanzuren van mest met zwavelzuur opgenomen worden als emissiearme maatregel, dan zou aanvullende regelgeving moeten gelden omtrent maximale zwavelgiften. Dat zou wel betekenen dat het zwavelgehalte in aangezuurde mest de hoeveelheid dierlijke mest die per hectare aangewend mag worden kan beperken.

Er is op dit moment geen wettelijke beperking voor het gebruik van zwavel. Er is wel een bemestingsadvies dat is gebaseerd op de zwavelbalans van een perceel. Deze is gebaseerd op het geteelde gewas, de bodemvoorraad en de aanvoer via depositie en mineralisatie (Schils, 2016). De adviesgift op bouwland 'loopt uiteen van 0 tot 55 kg S per ha' en het is dus afhankelijk van de regio en het gewas (ibid.). De geadviseerde zwavelgiften voor gras en snijmaïs zijn maximaal respectievelijk 40 kg en 30 kg per ha.

Daarbij varieert de zwaveldepositie ook per regio van Nederland vanwege de grotere industriële activiteit en de zeescheepvaart. In het noorden, gedurende het groeiseizoen, is de depositie maar 3 kg per ha, terwijl die in het zuidwesten ruim 8 kg per ha is (ibid.). Er zijn ook andere bronnen. Zo worden zwavelverbindingen gebruikt in bestrijdingsmiddelen tegen insecten en schimmels. Ook in chemische luchtwassers in de intensieve veehouderij wordt zwavelzuur gebruikt om de ammoniakemissie te beperken. Het zwavelgehalte in het spuiwater (restproduct) daarvan varieert enorm tussen de verschillende luchtwassers: 15 tot 80 kg per ton terwijl ook de stikstofgehalten variëren tussen de 10 en de 80 kg per ton (ibid.). Er wordt geschat dat de gemiddelde zwavelaanvoer via spuiwater 2-3 kg S per ha is (Schils, 2016).

De bodemvoorraad aan zwavel varieert per bodem type. Volgens Schils (2016) is deze voorraad op zand, löss en klei aan het begin van het groeiseizoen ongeveer 10-15 kg zwavel per ha in de laag van 0-30 cm. Bij klei op veen is dat circa 50 kg per ha.

**Tabel 3** Zwavelbalans (kg S per ha) per regio en gewasgroep (links). De zwavelbehoefte van verschillende gewassen (Schils, 2016) (rechts).

Overzicht van de zwavelbalans (kg S per ha) per regio en gewasgroep. Naarmate gewassen een hogere zwavelbehoefte hebben (vraag 9 en 10), komen tekorten vaker voor. Vanwege het hoge zwavel-leverende vermogen van de bodem, komen in het Hollands en Utrechts weidegebied nooit tekorten voor (Commissie Bemesting Akkerbouw/Vollegroondsgroententeelt).					De zwavelbehoefte van verschillende gewassen. (www.handboekbodembemesting.nl)		
Zwavelbehoefte van het gewas					Behoeft	Gewassen	Zwavelbehoefte (kg S per ha)
Regio	Ze	Hoog	Matig	Laag			
Noordelijke klei	-45	-15	5	20	Ze	sluitkool, spruitkool	80
Zuidwestelijke klei en rivierklei	-25	5	25	45	Hoog	bloemkool, Chinese kool, knolselderij, koolzaad	50
IJsselmeerpolders	0	30	50	65	Matig	aardappel (consumptie, zetmeel), boerenkool, broccoli, granen, graszaad, peen, peulvruchten (erwt, boon) prei, snijmais (hoge opbrengst), uien	30
Noordwestelijk en westelijke klei	-10	20	40	55	Laag	pootaardappel, sla, snijmais (lage opbrengst), suikerbiet, vlas	15
Oude zeeklei (droogmakerijen, Hollandse/Utrechtse weiden)	0	30	50	65			
Kleiig veen (Hollandse/Utrechtse weiden)	40	70	90	105			
Noordelijke en noordoostelijke zand- en dalgronden	-50	-20	0	15			
Oostelijk, centraal, zuidelijke en zuidoostelijk zand	-50	-20	0	15			
Löss	-45	-15	5	10			

Tabel 3 laat zien dat vanwege het hoge zwavel-leverende vermogen van de bodem tekorten in de Hollandse en Utrechtse (veen)weidegebieden nooit voorkomen, en vrijwel niet op de klei van de IJsselmeer-polders en de oude zeeklei.

Voor de gewassen zelf zijn er zelden nadelige effecten vanwege een overmaat aan zwavel. Schils (2016) meldt wel dat excessieve zwavelbemesting van boven de 150-200 kg per ha de opbrengst van grasland kan verlagen. Bij dieren ligt dit anders. Vanwege de wisselwerking met selenium, koper en molybdeen kunnen gezondheidsproblemen ontstaan zoals slechte groei, verminderde weerstand, diarree, baarmoederontsteking, etc. (ibid.).

Ook de natuur heeft last van de verzurende werking van zwavel en andere stoffen zoals ammoniak en stikstofoxiden (NO, NO<sub>2</sub>) en zuur. Dit zorgt voor een afname van de biodiversiteit en een vermindering van de vitaliteit van bomen. Schils (2016) meldt dat de ernst van het probleem inmiddels afgenomen is, maar nog niet opgelost. Opgehoopt zwavel in het bezinksel op de bodem in venen remt het herstel van de waterkwaliteit. Sulfaat kan ook indirect leiden tot voedselverrijking van natte gebieden en waterecosystemen (Lamers et al., 2002).

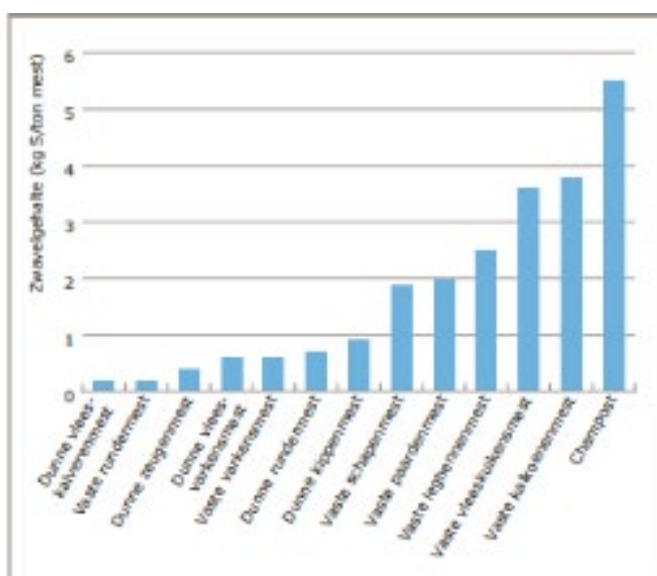
De Wereld Gezondheidsorganisatie (WHO) heeft geen richtlijn voor sulfaat in drinkwater vastgesteld omdat sulfaat, in principe, niet giftig is voor mensen. (Natrium)Sulfaat is het op drie na meest voorkomende ion in zeewater (achter natriumchloride en magnesium). In Nederland bestaan grote verschillen in sulfaatgehalte tussen verschillende gronden, van meer dan 100 mg/l tot bijna nul (Schils, 2016; zie ook Velthof et al., 2016).

Dat neemt niet weg dat er maximum eisen worden gesteld in het Drinkwater-besluit. Het sulfaatgehalte in drinkwater mag niet hoger zijn dan 150 mg per liter (Melse et al., 2015; Schils, 2016). Deze norm behoort tot de 'esthetische kwaliteitskenmerken' (geur, kleur en smaak) (Schils, 2016).

**Tabel 4** Type gronden i.r.t. normoverschrijding (links). Sulfaatgehalte normen & gemiddelde sulfaatgehalte van enkele locaties (rechts) (Schils, 2016).

In de Zand- en Lössregio komt overschrijding van de streefwaarde voor grondwater (150 mg sulfaat per liter) slechts beperkt voor. In de Klei- en Veenregio komt overschrijding van deze norm veelvuldig voor in het uitspoelingswater, maar minder vaak in het ondiepe en diepe grondwater. Voor oppervlaktewater is het beeld vergelijkbaar.			Overzicht van de normen die in Nederland gelden voor het sulfaatgehalte in water.		
Regio	Watertype	Normoverschrijding (%)	Watertype	Norm	Sulfaat (mg per liter)
Zand en löss	Diep grondwater	<10	Zoet oppervlaktewater	Maximaal Toelaatbaar Risiconiveau (MTR)	100
	Ondiep grondwater	<5	Grondwater	Streefwaarde	150
	Uitspoelingswater	<5	Drinkwater	Maximumwaarde	150
	Oppervlaktewater	<15	Afvalwater	Maximumwaarde	300
Klei en veen	Diep en ondiep grondwater	<1 (veen) / <15 (klei)	Te infiltreren oppervlaktewater	Toetsingswaarde	150
	Uitspoelingswater	40-45	Gemiddelde sulfaatgehalte in het drinkwater van enkele drinkwaterlocaties in Nederland.		
	Oppervlaktewater	30-45	Provincie	Sulfaat (mg per liter)	
			Limburg	< 5	
			Zeeland	< 4	
			Zuid-Holland	43	
			Noord-Holland	49	

Dieren krijgen zwavel vooral via het voer en drinkwater. Zwavel is belangrijk voor de dieren maar een deel hiervan wordt weer uitgescheiden. Zwavel is een van de componenten van mest. De hoeveelheid zwavel in mest hangt niet alleen af van het type dier (zie Figuur 6), maar ook met het rantsoen en het mestmanagement.



**Figuur 6** Totaal zwavelgehalte (kg S/ton mest) van enkele gangbare soorten dierlijke mest (Schils, 2016).

---

Melse et al. (2015) berekenen:

'Gemiddeld gezien bevat niet-aangezuurde rundveedrijfmest ca. 0,7 kg S/ton mest. Bij het aanzuren wordt gemiddeld een hoeveelheid van 5,7 kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> toegevoegd per ton rundveedrijfmest, oftewel 1,7 kg S/m<sup>3</sup>. Hierdoor stijgt het zwavelgehalte tot ca. 2,4 kg S/ton mest. Uitgaand van een stikstofgehalte van 4,1 kg N/ton mest en een stikstofgift van 170 kg N/ha resp. 250 kg N/ha (voor derogatiebedrijven), betekent dit dat de zwavelgift toeneemt met 70 resp. 104 kg S/ha (Ehlert & Chardon, 2014) tot een totale hoeveelheid van 99 resp. 147 kg S/ha. Dit laatste is gelijk aan 296 resp. 440 kg SO<sub>4</sub>/ha.'

Zwavel is een element dat belangrijk is voor dieren, planten en ecosystemen, maar een teveel aan zwavel kan leiden tot vervelende (smaak, geur) gevolgen voor drinkwater en negatieve effecten voor dieren en ecosystemen. Deze gevolgen zijn daarbij afhankelijk van de type grond, gewas en natuurgebieden. Huijsmans et al. (2015) en van het seizoen (zie bijvoorbeeld DLV Advies<sup>13</sup>).

Vergelijkbare argumenten en vragen speelden in Denemarken rondom het toelaten van het mest-aanzuursysteem op basis van zwavelzuur. In een notitie uit 2011 (Petersen et al., 2011) – persoonlijke communicatie november 2021) ten behoeve van de Deense beleidsvorming werd gerefereerd naar het werk dat Lamers et al. (2002) in Nederland hebben uitgevoerd en gemeld dat, hoewel dit type onderzoek in Denemarken niet is uitgevoerd, mogelijk ook in Deense wetlands eutrofiëring plaats kan vinden vanwege een eventuele verhoging van het sulfaatgehalte. Over andere water ecosystemen in Denemarken maakten de auteurs zich echter geen zorgen. In Denemarken is er vervolgens voor gekozen om deze maatregel te erkennen als ammoniakemissiereducerende maatregel.

Het zwaveloverschot ligt in Nederland rond de 13 kg S per ha cultuurgrond (Schils, 2016). Ontwikkelingen rondom de te verwachten verdere vermindering van de zwaveldepositie en de reductie van kunstmeststoffen vanwege het streven naar kringlooplandbouw kunnen dit overschot beïnvloeden. Zo worden in Denemarken meststoffen die zwavel bevatten algemeen gebruikt om zwavel-tekort te voorkomen (Eriksen et al., 2002; Jez, 2008). In de biologische landbouw, waar kunstmest niet is toegestaan wordt gevreesd dat de zwavel-behoefte van het gewas op de langere termijn niet gedekt kan worden (Eriksen et al., 2002). Hoe dan ook en op de korte termijn, mocht zwavel ingezet worden voor het aanzuren van mest in Nederland dan zal er regelgeving geformuleerd moeten worden om maximale zwavelgiftten per type mest, grond en gewas te bepalen.

### 3.1.2 Andere zuren

De meeste zorgen rondom het aanzuren van mest gaan over zwavel. Er zijn echter verschillende zuren en aanzuuropties die ingezet kunnen worden om mest onder pH 6 te brengen voor het reduceren van ammoniak- en methaanemissies, zie Hoofdstuk 2. Bij het toepassen van deze alternatieven dienen de volgende aspecten in acht te worden genomen.

*Salpeterzuur* (HNO<sub>3</sub>) verhoogt het stikstofgehalte van de mest en zorgt daarmee voor een gunstiger N/P-verhouding in de mest in relatie tot de behoefte van gewassen. Dit is natuurlijk positief vanuit agronomisch perspectief, maar kan uiteraard ook leiden tot hogere mestoverschotten op het veehouderijbedrijf, of op regionaal of nationaal niveau. Verder is salpeterzuur een eenwaardig zuur, wat wil zeggen dat er slechts één waterstofion vrijkomt, in tegenstelling tot het tweewaardige H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (zwavelzuur). Daardoor is het zuurverbruik groter bij gebruik van salpeterzuur.

*Fosforzuur* (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>). Dezelfde kwestie rond toenemende bemestingswaarde en bemestingsgrenzen speelt bij de toepassing van fosforzuur waarbij het fosfaatgehalte van de mest omhoog gaat. Argumenten rondom trends om het gebruik van kunstmeststoffen terug te dringen in het kader van de kringlooplandbouw transitie (en/of verkleinen van de veestapel) waardoor de theoretische behoefte aan nutriënten kan toenemen zijn bij salpeterzuur en fosforzuur ook van toepassing. Evenals de behoefte aan regelgeving voor maximale giften.

*Zoutzuur* is ook een sterk zuur waarmee mest naar de gewenste pH kan worden gebracht. Het is net als salpeterzuur een eenwaardig zuur waardoor er een grotere hoeveelheid zuur nodig is dan met zwavelzuur

---

<sup>13</sup> DLV Advies: 'Bemest gras nu met zwavel' - Nieuwe Oogst (geraadpleegd maart 2022).

---

om hetzelfde aanzurend effect te bereiken. Met zoutzuur wordt echter het gehalte chloride in drijfmest verhoogd, en dit is onwenselijk vanuit bodemkundig en ecologisch perspectief.

Over *organische zuren* hebben wij geen negatieve effecten voor het milieu gevonden. Er zou wel sprake kunnen zijn van een toename van geuroverlast.

### 3.1.3 Verzuringseffect

Zandgronden hebben in Nederland een zuurgraad tussen pH 5,5-6,5 en dit is ook de streefwaarde voor het aanzuren van mest (pH 5,5, in de stal en 6,5 bij aanwending). Andere gronden hebben een hogere pH tot wel pH 8 (kleigronden: 7,5-8 pH). Bij een groot gebruik van aangezuurde mest kan het mogelijk zijn dat de pH van zulke bodems gaat dalen. Overigens heeft de aanwending van kunstmest ook een verzurend effect op de bodem, en ook nu al is het gangbaar om kalk te gebruiken om de zuurgraad op peil te houden. Dat is volgens Deense onderzoekers (persoonlijke communicatie november 2021) ook de huidige praktijk in Denemarken, op grond waarvan ze geen negatieve effecten verwachten en ook niet hebben geconstateerd bij het aanwenden van aangezuurde mest.

Een belangrijke reden voor maatregelen als aanzuren van mest is de beperking van ammoniakemissie en als gevolg daarvan en verlaging van de depositie. Daar staat tegenover dat er voor verschillende (m.n. anorganische) zuren zowel bodemkundige zorgen zijn, als ook belemmeringen in de mestwetgeving. De balans daartussen moet nog worden opgemaakt. Een relatief nieuw gewicht in die balans ten faveure van aanzuren is het reducerende effect op de emissies van broeikasgassen uit mestkelders en -opslagen.

## 3.2 Investerings- en operationele kosten & inpasbaarheid op het primaire bedrijf

Aanzuren van mest (urine, fracties, etc.) leidt niet alleen tot positieve en negatieve effecten voor het milieu maar ook voor het primaire bedrijf. In hoofdstuk 2 hebben we al gezien dat deze maatregel kansen biedt op het gebied van de steeds hogere eisen met betrekking tot BKG- en ammoniakemissies. In deze paragraaf gaan we in op een aantal belangrijk aspecten waarmee veehoudsters/ers rekening moeten houden op het primair bedrijf.

### 3.2.1 Investerings- en operationele kosten

Er is nog geen precies antwoord op de vraag wat een aanzuur-installatie zou gaan kosten in Nederland. Die kosten zijn bovendien mede afhankelijk van de toepassing, zoals aanzuren van het hele volume aan drijfmest (à la Deense JH/Agro) of alleen aanzuren van de dunne fractie. Vanuit de ervaring in Denemarken kan wel een indicatie worden gegeven.

Sommer et al. (2015) hebben een studie uitgevoerd in de Deense context naar de scheiding van mest en het aanzuren van de dunne en dikke fracties in vergelijking met mest aanzuren in de stal (zie ook Kai et al., 2008). Ze kwantificeerden de effecten van deze maatregelen op de bemestingsefficiëntie, energie en de accumulatie van zware metalen. Ze concluderen in ieder geval dat beide handelingen mestmanagement duurder maakt. Ze berekenden voor een varkensbedrijf dat jaarlijks 6.899 ton drijfmest produceert, de totale kosten (vast en operationeel) van aanzuren 5,2 US\$/m<sup>3</sup> bedroegen, bijna een verdubbeling van de kosten van drijfmestmanagement zonder die maatregel. Daar stond tegenover dat de 'Mineral Fertilizer Equivalent' (MFE) steeg. Volgens deze onderzoekers (Sommer et al., 2015) bevat 1 ton varkensdrijfmest bij uitscheiding circa 7 kg N. Aanzuren van die drijfmest bij aanwending zorgde voor een verhoging van de MFE van circa 2,5 kg/ton slurry, wat overeenkomt met een kostenbesparing op mest van US\$2/ton slurry. Tabel 5 toont o.a. de kosten van het aanzuren van één ton varkensdrijfmest met de volgende invoergegevens: investering US\$0,22 miljoen (US \$ 0,15-0,27 miljoen) en zuurkosten US\$0,19/(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

**Tabel 5** Kosten van aanzuren van varkens mengmest in de stal in Denemarken (K. Groenestein et al., 2020; Sommer et al., 2015).

Parameter*	Unit	Costs for acid tank, process tank, mounting, etc.
Investment	US\$	222 000
Annual capital costs	US\$/yr	19 689
Net labour input	US\$/yr	956
Maintenance/service contract	US\$/yr	4901
Electricity	US\$/m <sup>3</sup>	0.37
Acid	US\$/m <sup>3</sup>	1.16

\* Annual costs based on a 15-year depreciation period and an interest rate of 4%. Net labour input (0.01 man hour/t), service contract costs, extra electricity consumption (3 kWh/t) and acid consumption (6.1 kg/t) and cost (US\$0.19/t) (Environmental Protection Agency 2011).

Starmans en Melse (2011) hebben berekend welke kosten er in Nederland gemoeid zijn met het gebruik van alternatieve zuren voor luchtwassers ten opzichte van het gebruik van zwavelzuur uitgedrukt in euro/mol verwijderde NH<sub>3</sub>. Tabel 6 geeft het resultaat weer voor een aantal anorganische zuren en Tabel 7 voor een aantal organische zuren.

**Tabel 6** Kosten voor het in bulk aanschaffen van anorganische zuren. Prijspeil zomer 2010 (Starmans & Melse, 2011) uitgedrukt in euro/mol verwijderde NH<sub>3</sub>.

Stof	Producent*	Afname (kg)	Zuiverheid (%)	Zuur (mol)	Prijs (€)	Prijs (€/mol)	N** (-)	Prijs*** (€/mol NH <sub>3</sub> )
HI		0.0					1	
HBr	Sunivo	1000.0	48	25745.59	957.24	0.04	1	<b>0.04</b>
HCl	Sunivo	1000.0	31	88475.22	119.66	0.0014	1	<b>0.0014</b>
HF	Sunivo	1000.0	100	49975.01	497.76	0.01	1	<b>0.01</b>
HClO <sub>4</sub>		0.0	100				1	
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfide.net	1000.0	98	10403.84	262.44	0.03	2	<b>0.01</b>
HNO <sub>3</sub>		0.0	100				1	
HClO <sub>3</sub>		0.0	100				1	
HIO <sub>3</sub>		0.0	100				1	
H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>		0.0	100				2	
H <sub>3</sub> PO <sub>3</sub>	Sunivo	1000.0	99	12318.31	1157.46	0.09	3	<b>0.03</b>
HClO <sub>2</sub>		0.0	100				1	
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Sunivo	1000.0	100	10204.08	598.28	0.06	2****	<b>0.03</b>
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>		0.0	100				2****	
HNO <sub>2</sub>	Sunivo	1000.0	55	28855.45	378.91	0.01	1	<b>0.01</b>
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		0.0	100				1	

\* Bronverwijzing: Sunivo: <http://www.sunivo.com>; Sulfide.net: <http://www.sulfide.net>

\*\* N is de waardigheid van het zuur ten opzichte van NH<sub>4</sub><sup>+</sup> zoals uitgelegd in paragraaf 1.3.3

\*\*\* In vetschrift de laagste prijs per vermeld zuur

**Tabel 7**

Kosten voor het in bulk aanschaffen van organische zuren. Prijspeil zomer 2010 (Starmans & Melse, 2011) uitgedrukt in euro/mol verwijderde NH<sub>3</sub>.

Stof	Producent*	Afname (kg)	Zuiverheid (%)	Zuur (mol)	Prijs (€)	Prijs (€/mol)	N** (-)	Prijs*** (€/mol NH <sub>3</sub> )
Mierenzuur	EMD	30.5	98	676.13	325.46	0.48	1	0.48
Mierenzuur	Sunivo	1000.0	85	25558.78	561.58	0.02	1	<b>0.02</b>
Azijnzuur	Mallinckrodt	25.4	100	423.00	240.24	0.57	1	0.57
Azijnzuur	Mallinckrodt	204.1	100	3399.11	1518.82	0.45	1	0.45
Azijnzuur	EMD Chem.	211.0	100	3513.74	1165.44	0.33	1	<b>0.33</b>
Azijnzuur	Spectrum	210.0	100	3497.09	1409.54	0.40	1	0.40
Chloorazijnzuur	Sunivo	1000.0	97.5	10853.34	509.73	0.05	1	<b>0.05</b>
Propionzuur	Sunivo	1000.0	99	13631.59	1825.94	0.13	1	<b>0.13</b>
Butaanzuur	Alfa Aesar	0.5	100	5.45	16.11	2.96	1	2.96
Butaanzuur	Alfa Aesar	2.4	100	27.24	36.93	1.36	1	1.36
Butaanzuur	Sunivo	1000.0	99	11465.39	1693.52	0.15	1	<b>0.15</b>
Benzoëzuur	Sunivo	1000.0	99	8272.74	919.75	0.11	1	<b>0.11</b>
Melkzuur	Sunivo	1000.0	99	11101.24	856.73	0.08	1	<b>0.08</b>
Oxaalzuur	Sunivo	1000.0	99.6	7962.06	474.63	0.06	2	<b>0.03</b>
Malonzuur	Alfa Aesar	2.5	100	24.02	231.33	9.63	2	4.82
Malonzuur	Sunivo	1000.0	99	9703.18	4184.73	0.43	2	<b>0.22</b>
Barnsteenzuur	Sunivo	1000.0	99	8552.93	1160.65	0.14	2	<b>0.07</b>
Maleïnezuur	Spectrum	45.0	100	387.60	1212.50	3.13	2	1.56
Maleïnezuur	Sunivo	1000.0	99	8700.27	1780.47	0.20	2	<b>0.10</b>
Fumaarzuur	Spectrum	12.0	100	103.45	389.12	3.76	2	1.88
Fumaarzuur	Alfa Aesar	10.0	100	86.21	100.70	1.17	2	0.58
Fumaarzuur	Sunivo	1000.0	99.5	8664.01	961.23	0.11	2	<b>0.06</b>
Glutaarzuur	Spectrum	25.0	100	189.25	1916.61	10.13	2	5.06
Glutaarzuur	Sunivo	1000.0	99	7646.49	7382.71	0.97	2	<b>0.48</b>
Adipinezuur	Alfa Aesar	25.0	100	171.12	207.40	1.21	2	0.61
Adipinezuur	Spectrum	45.0	100	308.01	926.13	3.01	2	1.50
Adipinezuur	Sunivo	1000.0	99.7	6865.22	1111.20	0.16	2	<b>0.08</b>
Ftaalzuur	Alfa Aesar	5.0	100	30.10	214.58	7.13	2	3.56
Ftaalzuur	Sunivo	1000.0	99.5	6050.72	1037.81	0.17	2	<b>0.09</b>
Citroenzuur	BDH	125.0	100	650.70	1243.28	1.91	3	0.64
Citroenzuur	Sunivo	1000.0	100	5205.62	693.20	0.13	3	<b>0.04</b>

\* Bronverwijzing: Sunivo: <http://www.sunivo.com>; Mallinckrodt: <http://www.mallinckrodt.com>; Alfa Aesar: <http://www.alfa.com>; EMD: <http://www.emdchemicals.com>; Spectrum: <http://www.spectrumchemical.com>; BDH: <http://www.bdhsupplies.com>

\*\* N is de waardigheid van het zuur ten opzichte van NH<sub>4</sub><sup>+</sup> zoals uitgelegd in paragraaf 1.3.3

\*\*\* In vetschrift de laagste prijs per vermeld zuur

Starmans en Melse concluderen dat het gebruik van citroenzuur vier keer zo duur is als het gebruik van zwavelzuur (prijspeil 2010). Gollenbeek et al. (2021) gaan uit van een prijs van rond 60 euro per ton zwavelzuur (concentratie 96 %) (Uit Super pro designer 2018). Starmans en Melse (2011) rekenden met 262 euro per ton zwavelzuur. Bossin (2015) rekent met een prijs van 140 euro/ton zwavelzuur. Gebruikte prijzen lopen dus sterk uiteen; bulkprijzen liggen in het algemeen lager.

De prijs van zwavelzuur is relatief laag t.o.v. de prijs van andere zuurmiddelen waardoor meestal voor zwavelzuur gekozen wordt. Het is een product dat in grote volumes op de markt komt. De grondstof voor de productie van zwavelzuur is vooral elementair zwavel dat als restproduct vrijkomt bij de ontzwaveling van industriële gassen. Op basis van deze referenties kan geconcludeerd worden dat anorganische zuren in principe goedkoper zijn voor de protonering van ammoniak dan organische zuren.

Er zijn verschillende factoren die de kosten beïnvloeden. Bussink et al. (2012) berekenden dat het aanzuren met zwavelzuur 60 tot 130 € per koe per jaar kost, oftewel 4 tot 8,5 € per kg bespaarde ammoniak. Deze onderzoekers berekenden ook de kosten van biologisch aanzuren, 'de geschatte kosten voor biologisch aanzuren variëren tussen de 4 en 20 € per kg bespaarde NH<sub>3</sub> (of 50 tot 310 € per koe). De hoeveelheid organisch substraat die nodig is bepaalt grotendeels de variatie in kostprijs' (Bussink et al., 2012). Bussink et al. (2011) melden dat destijds (2011) de kosten van het aanzuursysteem op het primaire bedrijf vergelijkbaar waren met de kosten van emissiearme stallen in de melkveehouderij. Meer recentere data laten zien dat (ammoniak)emissiearme vloeren 11 tot 109 euro per koe per jaar kosten en een luchtwasser 71 euro per koe per jaar (KWIN, 2020-2021).

---

Aanschaf- en onderhoud van het systeem vormen samen met het gebruik van zuur de grootste kostenpost. Vanwege de hoge kosten voor het aanschaffen van het aanzuursysteem in de stal, betekent dit dat de kosten per dier geringer worden bij een toename van de bedrijfsgrootte (Bussink et al., 2011).

De kosten van aanzuren zijn een (weliswaar belangrijk) deel van het verhaal. In de literatuur ging het bijvoorbeeld vooral over de kosten in relatie tot de reductie van ammoniakemissie. Daar komt nu de overweging bij dat aanzuren ook tot een reductie van broeikasgasemissie leidt. Aan de andere kant is zwavelzuur op dit moment weliswaar goedkoop, als restproduct van de verbranding van fossiele brandstoffen, maar dat zal in de nabije toekomst veranderen als fossiele brandstoffen worden uitgefaseerd.

Vervolgens moet er rekening worden gehouden met kostenbesparing die bereikt kan worden door een afnemende noodzaak om N- of S-kunstmest aan te kopen: er blijft immers meer N behouden in de mest door aanzuren en zwavelzuur voegt S toe aan de mest (Bussink & van Rotterdam-Los, 2011). In een onderzoek van Huijsmans et al. (2015) leidde de eenmalige aanwending van aangezuurde mest (2 en 4 l zwavelzuur per ton mest) tot een 10% hogere grasopbrengst (350 kg drogestof bij een gemiddelde opbrengst van ca. 3500 kg drogestof per ha) bij de eerste snede na aanwending. Dat effect was verdwenen bij de tweede snede.

Ook kunnen combinaties met andere technieken meegenomen worden in de verschillende berekeningen. Bijvoorbeeld de combinatie met vergisting. Im et al. (2021; zie ook Bussink & van Rotterdam-Los, 2011) bestudeerden de mogelijkheid om zwavelzuur te vervangen door citroenzuur om emissies te reduceren, waarbij ze, zoals eerder vermeld, interessante reductie percentages vonden. Vervolgens keken ze echter ook naar de biogasproductie. Een vergister die continue werd gevoed met de door citroenzuur aangezuurde varkensdrijfmest, leverde een aanzienlijk hogere CH<sub>4</sub>-opbrengst van 10,0 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ton varkensdrijfmest vergeleken met de controle (5,7 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ton), vanwege het behoud van organische stoffen door aanzuren en het toegevoegde citroenzuur zelf. Waar in de controle in totaal ongeveer 8,5 kg CH<sub>4</sub>/ton varkensdrijfmest ontstond (waarvan 4,4 als emissie uit de opslag, en 4,1 als gecoproduceerd biogas), verschoof de verhouding door aanzuren met citroenzuur naar 0,7 emissie uit de opslag en 7,1 als gecoproduceerd biogas. Totaal ontstond er dus iets minder methaan (7,8 CH<sub>4</sub>/ton), maar een veel groter deel daarvan was bruikbaar als biogas. Hoewel de productie van citroenzuur ook een CO<sub>2</sub>-voetafdruk heeft, berekenden de auteurs dat er nog steeds een netto BKG-reductie van 107 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton varkensdrijfmest kon worden bereikt door aanzuren met citroenzuur. Economisch gesproken leverde aanzuren met citroenzuur in combinatie met vergisten ook meer op, dan vergisten alleen, namelijk 6,3 USD/ton varkensdrijfmest versus 2,4 USD/ton.

Op de korte termijn zijn commerciële systemen om het totale volume aan mest te kunnen aanzuren vanwege de investerings- en operationele kosten vooral geschikt voor relatief grote bedrijven. Ook voor bedrijven die emissies moeten reduceren om vergunningen te kunnen verkrijgen. Dit is ook het geval in Denemarken (persoonlijke communicatie september 2021), waar de geleverde systemen geschikt zijn voor bedrijven met grote aantallen dieren. Voor een bedrijf met 2.000 vleesvarkensplaatsen zijn de totale kosten berekend rond 3,7€ per dierplaats en 1,7€ voor een bedrijf met 8.000 varkensplaatsen. Aan de andere kant zullen de behoefte aan maatregelen die de ammoniak- en de methaanemissies reduceren evenals de mogelijkheid om alleen de dunne fractie of het inoculum te verzuren tot andere kosten en afwegingen leiden.

### 3.2.2 Inpasbaarheid op het bedrijf

Bij het aanzuren van mest moet rekening worden gehouden met mogelijke risico's voor mensen en dieren. Zo kan bij het gebruik van zwavelzuur ook het giftige gas H<sub>2</sub>S ontstaan. Daarom wordt in Denemarken de mest aangezuurd buiten de stal in een mixer-tank. Het risico ontstaat namelijk bij het mixen. Na het mixen kan de aangezuurde mest terug worden gepompt naar de mestkelder. Er zijn protocollen voor het werken met zuren (net als voor luchtwassers) en geautomatiseerde systemen voor het mixen, meten van zuurgraden, etc. De geïnterviewde Deense onderzoekers konden geen noemenswaardig ongeluk melden sinds de implementatie van dit systeem circa tien jaar geleden.

Het gebruik van salpeterzuur kent ook risico's. Als salpeterzuur aan een voorraad mest wordt toegevoegd is het mogelijk dat nitraat direct denitrificeert en dus direct omgezet wordt tot stikstofgas (N<sub>2</sub>). Stikstofgas is

---

onschadelijk, maar er kunnen ook nitreuze dampen (mengsel van stikstofoxiden: stikstofmonoxide (NO), stikstofdioxide (NO<sub>2</sub>), distikstofmonoxide/lachgas (N<sub>2</sub>O) en distikstoftetraoxide (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)) worden gevormd. Een dergelijk ongeluk is gebeurd in België in 2017<sup>14</sup>.

Over het algemeen zijn de anorganische zuren sterker dan de organische zuren. Tegelijkertijd zijn de sterkere zuren ook reactiever. Daardoor kunnen de risico's op schade en voor de veiligheid (corrosie, aantasting beton, H<sub>2</sub>S vorming) ook groter zijn. Zuren worden ingedeeld in categorieën van agressiviteit ten opzichte van beton. Zwavelzuur is bijvoorbeeld 'zeer agressief', citroenzuur 'sterk agressief', en azijnzuur 'matig tot sterk agressief' (bron: Cement en beton centrum). Voor de daadwerkelijke aantasting is van belang welke pH en concentratie aanwezig zijn gedurende welke periode en de betonkwaliteit. Ook wat dit aspect betreft melden Deense onderzoekers dat de schade in de praktijk tot nu toe meevalt.

Het toevoegen van organische zuren is minder risicovol maar kan wel tot geur leiden. Daar staat tegenover dat de concentraties van ammoniak in de stal worden gereduceerd, wat weer positieve effecten heeft op de gezondheid en welzijn van mens en dier.

Ruimtelijk kan aanzuren consequenties hebben. Zo omvat het JH/Agro-systeem o.a. een mixer-tank en externe mestopslagen. Daarvoor moet ruimte beschikbaar zijn op het bouwblok en is op zijn minst een omgevingsvergunning nodig.

### 3.3 Institutionele aspecten

*'De druiven zijn zuur', zei de vos, maar hij kon er niet bij*

Terwijl aanzuren van mest in Denemarken wordt toegepast, is het in Nederland nimmer van de grond gekomen. In deze paragraaf kijken we naar de achterliggende redenen daarvoor, die vooral institutioneel van aard zijn.

In Nederland zijn al in de jaren negentig een aantal onderzoeken uitgevoerd naar het aanzuren van drijfmest waarin duidelijk ammoniakemissiereducties werden vastgesteld (Verboon & van Lent, 1990; van Westreenen et al., 1992; Hendriks et al., 1993; van Lent, 1993). Echter, de bodemkundige zorgen met betrekking tot (teveel aan) zwavel speelden hier een rol en werden nadrukkelijk gearticuleerd in 2014 door de Commissie Deskundigen Meststoffenwet (CDM, 2014; zie ook Schils, 2016). Die waarschuwde voor te grote volumes aan zwavel en pleitte er voor om zoveel mogelijk met andere maatregelen de emissie van ammoniak aan te pakken. In het verleden ging de discussie in Nederland vooral over het systeem waarmee alle drijfmest wordt aangezuurd, en dus speelden ook aspecten als de noodzaak van externe opslagen (ruimte, vergunningen en investeringen) een rol (Jacobsen, 2017). Gevoegd bij de beschikbaarheid van relatief simpelere en goedkopere maatregelen als emissiearme vloeren met het behoud van de functie van de mestkelders, heeft dit tot gevolg gehad dat de maatregel mest aanzuren niet structureel in de regelgeving en in de praktijk is opgenomen.

Een uitzondering vormde de opname binnen de Regeling ammoniak en veehouderij (Rav) van het aanzuren van mest als tijdelijke maatregel in het kader van de stoppersregeling voor de varkenshouderij. Deze regeling was alleen bedoeld voor stoppers - vóór 1 januari 2020. Het betrof het aanzuren van de mestopslag met zwavelzuur tot pH <6. Het zuur werd in een tussenopslag toegevoegd. 'Verse mest wordt in de stal weggespoeld met aangezuurde mest en wordt een laagje aangezuurde mest in de mestkelder gezet om de verse mest in op te vangen' (systeembeschrijving 2012)<sup>15</sup>. Voor deze maatregel werd een ammoniakemissiereductie van 70% gehanteerd. Daarnaast stond dezelfde regeling het toevoegen van het diervoederadditief benzoëzuur (1%) toe als emissie-reducerende maatregel met een reductiepercentage van 16% (bron website Infomil<sup>16</sup>). Hiermee krijgt de drijfmest via de uitscheiding een lagere zuurgraad. Dit waren zoals gezegd tijdelijke maatregelen voor stoppers inzake de vergunningverlening vanwege

---

<sup>14</sup> [Situatie Belgische dorpen onder controle na wolk salpeterzuur | NOS](#) Mensen gevluht voor gele gifwolk in België | NOS Jeugdjournaal (geraadpleegd mei 2022).

<sup>15</sup> [aav\\_2012\\_10\\_doc.pdf](#) (geraadpleegd maart 2022).

<sup>16</sup> [Tabel met maatregelen - Kenniscentrum InfoMil](#) (geraadpleegd maart 2022).

---

ammoniakemissie vanuit stallen. In de varkenshouderij zijn een aantal aanzuursystemen in de Rav-lijst opgenomen (D 1.1.6, D 1.1.7., D 1.2.8, D 1.3.4 en D 3.2.2). Voor de melkveehouderij zijn geen maatregelen in de Rav opgenomen omtrent het aanzuren van drijfmest.

Momenteel is het aanzuren van mest (fracties) in melkveebedrijven in Nederland niet verboden, maar het wordt ook niet gestimuleerd. Voor zover bekend zijn er geen bedrijven waarbij mest in de stal of bij aanwenden wordt aangezuurd. Er worden wel proeven uitgevoerd met het aanzuren van de dunne fractie.<sup>17</sup>

In tegenstelling tot Nederland heeft Denemarken het aanzuren van drijfmest wel goedgekeurd als emissiereducerende techniek, zowel in de stal als bij aanwending.<sup>18</sup> In Denemarken wordt 20% van de drijfmest aangezuurd voordat het wordt aangewend. Het voordeel is dat de drijfmest oppervlakkig mag worden toegediend met een sleepvoetbemester in plaats van te worden geïnjecteerd met een zodebemester. Volgens een VERA-statement (2012) bedraagt de ammoniakemissiereductie 49% voor het aanwenden van rundveedrijfmest die tijdens het uitrijden wordt aangezuurd.

Het geautomatiseerde aanzuursysteem van drijfmest met zwavelzuur van JH/Agro (JH Forsuring NH4+) is commercieel verkrijgbaar en behaalt bij melkvee een reductie van de ammoniakemissie van rond 30% (persoonlijke communicatie september 2021; Kasper et al., 2022). Het percentage is afhankelijk van de gehanteerde referentie (met of zonder vloerreiniging). Voor vleesvarkens is in een VERA-statement (2016) vastgelegd dat aanzuren van vleesvarkensdrijfmest leidt tot een reductie van 64% van de stalemissies van ammoniak. Er wordt ingeschat dat de methaanemissiereductie uit de mest >90% kan zijn. Momenteel zijn er rond 76 varkens- en 75 melkveebedrijven die deze techniek toepassen in Denemarken. Deze aantallen zijn de afgelopen tien jaar stabiel gebleven. De reden hiervoor zijn volgens een Deense expert o.a. de hoge investeringskosten waardoor alleen voor hele grote bedrijven zulke investeringen rendabel zijn. Daarnaast speelt de opmars van centrale(grote) mestvergistingsinstallaties en de rol van de vergistingsinstallaties. Die verwerken de mest van verschillende bedrijven (tot wel honderd) bedrijven en accepteren geen aangezuurde mest (persoonlijke communicatie september 2021). Volgens het Deense Energie agentschap waren er in 2020 36 grote vergistingsinstallaties en 59 primaire bedrijven met een vergister<sup>19</sup>.

Zoals eerder gemeld zijn Deense experts en beleidsmakers zich bewust van de discussies rondom zwavel, maar hebben ze met die kennis desondanks de beslissing genomen om mest aanzuren wél als milieumaatregel op te nemen in de regelgeving. Tot nu toe hebben ze geen negatieve effecten waargenomen – ook niet op het niveau van de primaire bedrijven.

---

<sup>17</sup> Vijf vragen over mest scheiden bij de bron en het nabehandelen van fracties - WUR (geraadpleegd maart 2022).

<sup>18</sup> Livestock Housing System (mst.dk) (geraadpleegd maart 2022).

<sup>19</sup> Biogas Taskforce | Energistyrelsen (ens.dk) (geraadpleegd maart 2022).

## 4 Conclusies

Ter afsluiting trekken we in dit hoofdstuk een aantal conclusies.

- 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 de 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). Dit maakt aanzuren in principe een interessante maatregel voor de verdere verduurzaming van de veehouderij.
  - Voor de stalemissie van ammoniak heeft het aanzuren van de mest alleen effect op het deel dat uit de mestkelder komt. Aanvullende maatregelen (emissiearme vloeren, primaire scheiding, reiniging technieken, etc.) zullen dan ook in de meeste gevallen in de melkveehouderij nodig zijn om aan de emissie-eisen te voldoen.
  - De mogelijkheid om met aangezuurde mest zowel in de stal als tijdens het aanwenden de emissie van stikstof te reduceren vergroot de effectiviteit van deze maatregel om stikstofverliezen binnen de landbouwketen te verminderen.
  - De methaanemissie uit de mest kan bijna volledig worden stilgelegd waardoor mest aanzuren een kansrijke maatregel is om aan toekomstige wettelijke of andere eisen ten aanzien van klimaatmitigatie bij te dragen.
- Verschillende anorganische (Petersen et al., 2012; Petersen et al., 2014; Sommer et al., 2017; Habtewold et al., 2018;) en organische (Fangueiro et al., 2015; Fuchs et al., 2021; Im et al., 2021) zuren kunnen gebruikt worden om de gewenste zuurgraad te bereiken.
  - Zwavelzuur is een restproduct van de productie van fossiele brandstoffen waardoor de inkoop prijs momenteel zeer voordelig is in vergelijking met andere zuren<sup>20</sup>.
  - De zwaveldepositie vanuit de industrie blijft naar verwachting verder dalen. Er blijven Nederlandse regio's waar een zwavelgift niet nodig is vanwege het hoge zwavelgehalte van de bodems. Voor andere regio's en voor gewassen met hoge zwavelbehoeften, en op bepaalde momenten (begin van het groeiseizoen) kan het evenwel wenselijk zijn om met zwavel verrijkte mest te gebruiken.
  - Bij het gebruik van andere zuren dan zwavelzuur verdwijnen de bodemkundige en landbouwkundige zorgen rondom een mogelijk overmaat aan zwavelgift.
  - In het algemeen zijn anorganische zuren (zwavelzuur, salpeterszuur, zoutzuur, fosforzuur, etc.) sterker dan organische zuren (azijnzuur, citroenzuur, melkzuur, propionzuur, maleïnezuur, mierenzuur, glutarzuur, etc.) waardoor de hoeveelheid organisch zuur die nodig is om dezelfde zuurgraad te bereiken groter is dan in het geval van anorganische zuren.
  - Ongeacht het gebruikte zuur moet duidelijk zijn welk effect het heeft op mens, dier en milieu. Organische zuren lijken daarbij over het algemeen minder risicovol.
- Tien jaar ervaring op primaire bedrijven in Denemarken heeft laten zien dat de noodzakelijke processen goed kunnen worden georganiseerd en geautomatiseerd, zodat risico's beheersbaar blijven. Protocolen blijven vereist bij het werken met zuren, vooral met anorganische zuren.
- Er zijn verschillende varianten van aanzuren om de emissies van ammoniak en BKG gericht te beperken en met minder zuur. In dit rapport kwamen de volgende varianten aan de orde:
  - Praktijkrijp:
    - Aanzuren van drijfmest bij aanwenden
    - Aanzuren van drijfmest in de directe nabijheid van de stal
    - pH van de urine verlagen via het voer
  - Maatregelen die nog een R&D traject nodig hebben:
    - Plasmatechnologie

<sup>20</sup> De transitie naar een biobased en circulaire economie kan zorgen voor het vervangen van fossiele grondstoffen door biologische grondstoffen en de beschikbaarheid en prijzen van organisch en anorganische zuren veranderen. Bijvoorbeeld kan azijnzuur uit actief slib bij waterzuivering geproduceerd worden [Productie van azijnzuur uit actief slib | STOWA](#) (geraadpleegd mei 2022).

- 
- Aanzuren van het inoculum
  - Aanzuren van de dunne fractie
  - Aanzuren van de mestoppervlakte
  - Aanzuren van de vloeroppervlakte

Op basis van de inzichten beschreven in dit rapport kan geconcludeerd worden dat aanzuren van mest effectief is in het integraal aanpakken van BKG- en ammoniakemissies en dat daarbij verschillende opties bestaan die de moeite waard zijn om te overwegen en waar nodig verder uit te werken. Deze varianten kunnen perspectief bieden voor specifieke bedrijfstypen of mestfracties. Voor grote bedrijven en bedrijven in de buurt van Natura2000 gebieden kan aanzuursystemen waarmee het hele volume aan drijfmest wordt aangezuurd een oplossing bieden. Voor deze (melkvee)bedrijven moeten aanvullende maatregelen worden genomen om de ammoniakemissie vanaf de vloer te reduceren. Het aanzuren van het inoculum, de mestoppervlakte, vloeroppervlakte of de dunne fractie zijn specifieke maatregelen die met andere opties gecombineerd kunnen worden. Deze vragen nader onderzoek. Logischerwijs zal het aanzuren van mest ook hernieuwde aandacht krijgen naarmate ook de (wettelijke of private) eisen aan de emissies van methaan uit mest worden aangescherpt.

---

# Dankwoord

We willen André Aarnink en Karin Groenestein (Wageningen Livestock Research) bedanken voor hun scherpzinnig en constructief commentaar op de laatste conceptversie van dit rapport.

---

# Literatuur

- Aarnink, A.J.A., Hol, A., & Nijeboer, G.M. (2008). *The ammonia emission reduction of adding benzoic acid (1% VevoVital<sup>®</sup>) to the diet of growing-finishing pigs was determined and amounted on average 15.8% compared to a diet without VevoVital*. Lelystad. Animal Sciences Group of Wageningen UR.
- Aarnink, A.J.A., & Puente-Rodríguez, D. (2017). International patent application. PCT/NL2018/050820.
- Adamsen, A.P., Nyord, T., & Hafner, S. (2021). *The stability of pH of acidified stored manure slurry: Advisory note from DCA – Danish Centre For Food And Agriculture*.
- Andersen, M. (2013). *Test report for JH-FORSURING NH4+*. Retrieved from [http://www.etv-denmark.com/files/agriculture/\\_JH\\_Forsuring\\_Test\\_report\\_ver1-5.pdf](http://www.etv-denmark.com/files/agriculture/_JH_Forsuring_Test_report_ver1-5.pdf).
- Berg, Türk, M., & Hellebrand, H.J. (2006). *Effects of Acidifying Liquid Cattle Manure with Nitric or Lactic Acid on Gaseous Emissions*. Paper presented at the Workshop on Agricultural Air Quality, Washington D.C. (USA) (pp. 492-498).
- Bossin, S. (2015). Emissiereductie door het aanzuren van mest. Innovatiesteupunt. Vlanderen: Boerenbond - Management & Techniek.
- Bussink, D.W., Van Rotterdam-Los, A.M.D., Vermeij, I., van Dooren, H.J.C, Bokma, S., Ouwerkerk, G.J., & H. Van der Draai, W. W. (2014). *Reducing NH3 emissions from cattle slurry by (biological) acidification: experimental proof and practical feasibility*. Wageningen. NMI, rapport 1422.N.12.
- Bussink, D.W., Van Rotterdam- Los, A.M.D., & Wenzl, W. (2012). *Biologisch aanzuren van mest kansrijk voor melkveebedrijven*. Wageningen. NMI, rapport 1422.N.11.
- Bussink, D.W., & van Rotterdam-Los, A.M.D. (2011). *Perspectieven om broeikasgas- en ammoniakemissies te reduceren door het aanzuren van mest*. Wageningen. NMI, rapport 1426.N.11.
- Capdevila-Cortada, M. (2019). Electrifying the Haber–Bosch. *Nature Catalysis*, 2, 1055. doi:10.1016/j.joule.2019.10.006
- CDM. (2014). Advies "Bemesting met zwavelhoudende meststoffen". Wageningen. Commissie Deskundigen Meststoffenwet (CDM).
- Chen, J., Wade, M.J., Dolfig, J., & Soyer, O.S. (2019) Increasing sulfate levels show a differential impact on synthetic communities comprising different methanogens and a sulfate reducer. *Journal of the Royal Society Interface*, 16 (154). doi: 10.1098/rsif.2019.0129.
- Ehlert, P.A.I., & Chardon, W.J. (2014). *Veranderingen van de zwavelbalans van de Nederlandse bodem. Beantwoording van een helpdeskvraag*. Wageningen. Alterra, Wageningen UR (University & Research Centre). Alterra-rapport 2516.
- Eriksen, J., Olesen, J.E., & Askegaard, M. (2002). Sulphate leaching and sulphur balances of an organic cereal crop rotation on three Danish soils. *European Journal of Agronomy*, 17(1), 1-9. doi:10.1016/S1161-0301(01)00143-5.
- 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.
- Fuchs, A., Dalby, F.R., Liu, D., Kai, P., & Feilberg, A. (2021). Improved effect of manure acidification technology for gas emission mitigation by substituting sulfuric acid with acetic acid. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100263. doi:10.1016/j.clet.2021.100263.
- Gollenbeek, L.R., van Gastel, J.P.B.F., Bussmann, P. .T.H., Melse, R.W., & Verdoes, N. (2021). *Verkenning mogelijke mestverwerkingsroutes en duurzaamheidsaspecten; NL Next Level Mestverwaarden WP2 (1270)*. Wageningen. Wageningen Livestock Research. Rapport 1270.
- Groenestein, C.M. (2006). *Environmental aspects of improving sow welfare with group housing and straw bedding*. PhD Thesis. Wageningen University, Wageningen.
- Groenestein, C.M., R. Melse, J. Mosquera, M. Timmermans. (2020). *Effect mestvergisting op de emissies van broeikasgassen uit mest van melkvee: een literatuur- en scenariostudie*. Wageningen. Wageningen Livestock Research. Rapport 1235.
- Gronwald, M., Helfrich, M., Don, A., Fuß, R., Well, R., & Flessa, H. (2018). Application of hydrochar and pyrochar to manure is not effective for mitigation of ammonia emissions from cattle slurry and poultry manure. *Biology & Fertility of Soils*, 54(4), 451-465. doi:10.1007/s00374-018-1273-x.
- Habtewold, J., Gordon, R., Sokolov, V., VanderZaag, A., Wagner-Riddle, C., & Dunfield, K. (2018). Reduction in Methane Emissions From Acidified Dairy Slurry Is Related to Inhibition of Methanosarcina Species. *Frontiers in Microbiology*, 8. doi:10.3389/fmicb.2018.02806.
- Hagner, M., Rätty, M., Nikama, J., Rasa, K., Peltonen, S., Vepsäläinen, J., & Keskinen, R. (2021). Slow pyrolysis liquid in reducing NH3 emissions from cattle slurry — Impacts on plant growth and soil organisms. *Science of the Total Environment*, 784, 147139. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.147139.

- Hendriks, J.G.L., Mulder, E.M., & Huijsmans, J.F.M. (1993). *Aanzuren van rundermest: - Mestsamenstelling bij aanzuren vlak voor het uitrijden. - Ammoniakemissie na toediening van aangezuurde mest op grasland*. Wageningen. IMAG-DLO. Rapport 93-30.
- Huijsmans, J.F.M., Hol, J.M.G., & van Schooten, H.A. (2015). *Toediening van aangezuurde mest met een sleepvoetenmachine op grasland*. Wageningen. Wageningen UR Plant Research International. Rapport 629.
- Im, S., Mostafa, A., & Kim, D.-H. (2021). Use of citric acid for reducing CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>S emissions during storage of pig slurry and increasing biogas production: Lab- and pilot-scale test, and assessment. *Science of the Total Environment*, 753, 142080. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142080.
- Jacobsen, B.H. (2017). Why is acidification of slurry a succes only in Denmark? Transfer of environmental technology across borders. Paper presented at the 21st International Farm Management Congress, Edinburgh, Scotland.
- Jez, J. (Ed.) (2008). *Sulfur: A Missing Link between Soils, Crops, and Nutrition*: American Society of Agronomy, Inc. Crop Science Society of America, Inc. Soil Science Society of America, Inc. doi: 10.2134/agronmonogr50.
- Kai, P., Pedersen, P., Jensen, J.E., Hansen, M.N., & Sommer, S.G. (2008). A whole-farm assessment of the efficacy of slurry acidification in reducing ammonia emissions. *European Journal of Agronomy*, 28(2), 148-154. doi:10.1016/j.eja.2007.06.004.
- Kasper, P.L., Dolriis, M.D., Fuchs, A., Kai, P., Riis, A.L. (2022). SVOVLSYREFORSURING I KVÆGSTALDE. Mælkeafgiftsfonden. SEGES Innovation Udgivet 14. Marts 2022.
- Kavanagh, I., Fenton, O., Healy, M.G., Burchill, W., Lanigan, G.J., & Krol, D.J. (2020). Mitigating ammonia and greenhouse gas emissions from stored cattle slurry using agricultural waste, commercially available products and a chemical acidifier. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126251. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126251.
- KWIN. (2020-2021). *KWIN 2021-2022 Kwantitative Informatie Veehouderij*. Wageningen. Wageningen Livestock Research. Handboek 43.
- Lamers, L.P.M., Falla, S.-J., Samborska, E.M., van Dulken, I.A.R., van Hengstum, G., & Roelofs, J.G.M. (2002). Factors controlling the extent of eutrophication and toxicity in sulphate-polluted freshwater wetlands. *Limnology and Oceanography*, 47(2), 585-593. doi:10.4319/lo.2002.47.2.0585.
- Li, S., Medrano Jimenez, J.A., Hessel, V., & Gallucci, F. (2018). Recent Progress of Plasma-Assisted Nitrogen Fixation Research: A Review. *Processes*, 6(12), 248. doi:10.3390/pr6120248.
- Ma, C., Dalby, F.R., Feilberg, A., Jacobsen, B.H., & Petersen, S.O. (2022). Low-Dose Acidification as a Methane Mitigation Strategy for Manure Management. *Agricultural Science & Technology*, . doi: 10.1021/acsagscitech.2c00034.
- Melse, R.W., Starmans, D.A.J., & Ogink, N.W.M. (2015). *Aanzuursystemen voor rundveedrijfmest in stallen*. Wageningen. Wageningen UR (University & Research) Livestock Research. Rapport 898
- Miranda C, Soares, A.S., Coelho, A.C., Trindade, H., & Teixeira, C.A. (2021). Environmental implications of stored cattle slurry treatment with sulphuric acid and biochar: A life cycle assessment approach. *Environmental Research*, 194, 110640. doi:10.1016/j.envres.2020.110640.
- Monteny, G.J. (2000). *Modelling of ammonia emissions from dairy cow houses*. PhD Thesis. Wageningen University, Wageningen.
- Ottosen, L.D.M., Poulsen, H.V., Nielsen, D.A., Finster, K., Nielsen, L.P., & Revsbech, N.P. (2009). Observations on microbial activity in acidified pig slurry. *Biosystems Engineering*, 102(3), 291-297. doi:10.1016/j.biosystemseng.2008.12.003.
- 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., Blanchard, M., Chadwick, D., Del Prado, A., Edouard, N., Mosquera, J., & Sommer, S.G. (2013). Manure management for greenhouse gas mitigation. *Animal*, 7(2), 266-282. doi:10.1017/S1751731113000736.
- 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., Nyord, T., Eriksen, J., Sørensen, P., & Elsgaard, L. (2011). Notat vedrørende forsuring af gylle til planteproduktion. Denemarken. Aarhus Universiteit.
- Puente-Rodríguez, D., & Bos, A.P. (2019). *Environmental Dairy Design for 2020 (EDD20): Ontwerpen voor huisvestingssystemen van melkvee met lage ammoniakemissie*. Wageningen. Wageningen Livestock Research. Rapport 1162.
- Sanders, W.T.M. (2001). *Anaerobic hydrolysis during digestion of complex substrates*. PhD Thesis. Wageningen University & Research, Wageningen.
- Schils, R.L.M. (2016). *30 vragen en antwoorden over zwavel*. Wageningen. Alterra, Wageningen UR. doi:10.18174/392373.

- Seidel, A., Pacholski, A., Nyord, T., Vestergaard, A., Pahlmann, I., Herrmann, A., & Kage, H.E. (2017). Effects of acidification and injection of pasture applied cattle slurry on ammonia losses, N<sub>2</sub>O emissions and crop N uptake. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 247, 23–32.
- Sokolov, V., VanderZaag, A., Habtewold, J., Dunfield, K., Tambong, J.T., Wagner-Riddle, C., Venkiteswaran, J.J., & Gordon, R. (2020a). Acidification of Residual Manure in Liquid Dairy Manure Storages and Its Effect on Greenhouse Gas Emissions. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 568648. doi:10.3389/fsufs.2020.568648.
- Sokolov, V.K., VanderZaag, A., Habewold, J., Dunfield, K., Wagner-Riddle, C., Venkiteswaran, J.J., Crolla, A. & Gordon, R. (2020b). Dairy manure acidification reduces CH<sub>4</sub> emissions over short and long-term. *Environmental Technology*, 42(18). doi:10.1080/09593330.2020.1714744.
- Sommer, S.G., Clough, T.J., Balaine, N., Hafner, S.D., & Cameron, K.C. (2017). Transformation of Organic Matter and the Emissions of Methane and Ammonia during Storage of Liquid Manure as Affected by Acidification. *Journal of Environmental Quality*, May-June, 514–521. doi:10.2134/jeq2016.10.0409.
- Sommer, S.G., Hjorth, M., Leahy, S.C., Zhu, K., Christel, W., & Sutaryo. (2015). Pig slurry characteristics, nutrient balance and biogas production as affected by separation and acidification. *Journal of Agricultural Science*, 153(1), 177–191. doi:10.1017/S0021859614000367.
- Starmans, D.A.J., & Melse, R.W. (2011). *Alternatieven voor zwavelzuur in chemische Luchtwatersers*. Lelystad. Wageningen UR Livestock Research. Rapport 385.
- Stelwagen, K., Zonderland, J.J., Boxem, T., Zom, R.L.G., van Duinkerken, G., & Smolders, E.A.A. (2000). *Mineralenvoeding tijdens de droogstand: het kation-anion verschil*. Lelystad. Praktijkonderzoek Rundvee, Schapen en Paarden (PR). 147.
- SyreN. (2020). SyreN System – Acidification of slurry. Biocover a/s.
- Tessier, D. (2013). Surface modification of biotextiles for medical applications. In *Biotextiles as Medical Implants* (pp. 137-156): Woodhead Publishing Series in Textiles. doi: 10.1533/9780857095602.1.137.
- van Lent, A.J.H. (1993). Lagere nitraatverliezen bij aanzuren van mest tot pH 4. *Praktijkonderzoek / Praktijkonderzoek Rundvee, Schapen en Paarden (PR), Waiboerhoeve*, 6(6). Retrieved from <https://edepot.wur.nl/47996>
- van Westreenen, S., Kroodsmas, W., & Huis in 't Veld, J.W.H. (1992). *Vermindering van amoniak emissie uit ligboxenstaldoor aanzuren. Deel 1*. Wageningen. DLO Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen. Nota 92-6.
- Velthof, G.L., Van Bruggen, C., Groenestein, C.M., Huijsmans, J.F.M., Luesink, H.H., Van der Sluis, S.M., Van der Kolk, J.W.H., Oude Voshaar, S.V., Vonk, J., Van Schijndel, M. W. (2016). *Referentieraming van emissies naar lucht uit de landbouw tot 2030.; Achtergronddocument bij de Nationale Energieverkenning 2015, met emissies van ammoniak, methaan, lachgas, stikstofoxide en fijnstof uit de landbouw tot 2030*. Wageningen. Wageningen Environmental Research. Rapport 2746.
- Verboon, M.C., & van Lent, A.J.H. (1990). Het aanzuren van mest in bedrijfsverband. *Praktijkonderzoek / Praktijkonderzoek Rundvee, Schapen en Paarden (PR), Waiboerhoeve*, 3(6). Retrieved from <https://edepot.wur.nl/34379>.
- Wagner, C., Nyord, T., Vestergaard, A. V., Hafner, S. D., & Pacholski, A. S. (2021). Acidification Effects on In Situ Ammonia Emissions and Cereal Yields Depending on Slurry Type and Application Method. *Agriculture*, 11, 1053. doi:10.3390/agriculture11111053.
- Zhang, N., Bai, Z., Ledgard, S., Luo, J., & Ma, L. (2021). Ammonia mitigation effects from the cow housing and manure storage chain on the nitrogen and carbon footprints of a typical dairy farm system on the North China Plain. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124465. doi:10.1016/j.jclepro.2020.124465.



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



---

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

---

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

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

