

juli 2011

1426.N.11

**Perspectieven om
broeikasgas- en ammoniak-
emissies te reduceren door
het aanzuren van mest**

dr.ir. D.W. Bussink

dr.ing. A.M.D. van Rotterdam-Los

nutriënten management instituut nmi bv

postbus 250

6700 ag wageningen

agro business park 10

6708 pw wageningen

tel. (0317) 46 77 00

fax (088) 876 12 81

e-mail nmi@nmi-agro.nl

internet www.nmi-agro.nl

© 2011 Wageningen, Nutriënten Management Instituut NMI B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit de inhoud mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de directie van Nutriënten Management Instituut NMI.

Rapporten van NMI dienen in eerste instantie ter informatie van de opdrachtgever. Over uitgebrachte rapporten, of delen daarvan, mag door de opdrachtgever slechts met vermelding van de naam van NMI worden gepubliceerd. Ieder ander gebruik (daaronder begrepen reclame-uitingen en integrale publicatie van uitgebrachte rapporten) is niet toegestaan zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van NMI.

Disclaimer

Nutriënten Management Instituut NMI stelt zich niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen voortvloeiend uit het gebruik van door of namens NMI verstrekte onderzoeksresultaten en/of adviezen.

Verspreiding

Inhoud

	pagina
Samenvatting en conclusies	3
1 Inleiding	7
1.1 Algemeen	7
1.2 Doelstelling	8
2 Achtergrond aanzuren mest	9
2.1 Broeikasgasemissie uit landbouw	9
2.2 NH ₃ -emissie	10
2.3 Aanzuren mest	11
2.3.1 Achtergrond	12
2.3.2 Voor- en nadelen aanzuren mest	13
2.3.3 Recent onderzoek	13
3 Aanzuren door middel van het Infarm systeem	17
3.1 Achtergrond	17
3.2 Voor- en nadelen aanzuren mest met Infarm systeem	17
3.3 Hoeveelheid zuur dat moet worden toegevoegd	18
3.4 Effect van aanzuren op NH ₃ -emissies en N-gehalte mest in de melkveehouderij	20
3.4.1 Stalemissie NH ₃	21
3.4.2 Emissie NH ₃ bij toedienen mest	22
3.4.3 Effect rantsoensamenstelling op NH ₃ -emissie	24
3.5 Effect van aanzuren op NH ₃ -emissies en N-gehalte mest in de varkenshouderij	25
3.6 Effect van aanzuren op broeikasgas emissies	26
3.6.1 CH ₄ -emissie	26
3.6.2 CO ₂ -emissie	27
3.6.3 N ₂ O-emissie	28
3.6.4 Broeikasgasemissie samenvattend	31
3.7 Kosten	32
3.8 Nader onderzoek en implementatiepotentieel in Nederland	34
4 Biologisch aanzuren van mest en innovaties uit Oostenrijk	35
4.1 Biologisch aanzuren	35
4.1.1 Voedingsbronnen voor micro-organismen	35
4.1.2 Zeoliet	37
4.1.3 De mestsamenstelling	37
4.1.4 Effect van biologisch aanzuren op NH ₃ -emissies en N-gehalte mest	38
4.1.5 Effect van biologisch aanzuren op broeikasgasemissies	38
4.1.6 Kosten biologisch aanzuren algemeen	39
4.2 Ervaringen in Oostenrijk	40
4.2.1 Achtergrond	40
4.2.2 Eerste proeven en waarnemingen	41
4.2.3 Kosten biologisch aanzuren met de Oostenrijkse innovatie	43
4.2.4 Eerste conclusies Oostenrijks systeem	43
4.2.5 Vervolgonderzoek in 2011	43
4.3 Nader onderzoek en implementatiepotentieel in Nederland	45

5	Ontwikkelingsperspectief voor Nederland	47
5.1	Een gecombineerd systeem	47
5.2	Onderzoeks- en kennisvragen	48
5.3	Hoe kosten toe te rekenen	48
5.4	Conclusies (en aanbevelingen)	48
6	Referenties	51

Appendix 1. NH ₃ emissies (kg N dier ⁻¹ jr ⁻¹) op basis van de Regeling ammoniak en veehouderij, gepubliceerd in Staatscourant 2435 februari 2011 voor de diercategorie melk- en kalfkoeien ouder dan 2 jaar.	55
---	----

Appendix 2. Mest aanzuren met base-neerslaande zouten	57
---	----

Samenvatting en conclusies

De huidige Nederlandse klimaatambities en het convenant 'Schone en zuinige agrosectoren' streven naar een reductie van de overige niet-CO₂ broeikasgassen. Daarnaast is de overheid bezig met het opstellen van een Programmatische Aanpak Stikstof (PAS), om onder andere een daling van de ammoniakemissie (NH₃) vanuit landbouwbedrijven in de buurt van Natura 2000 gebieden te realiseren. Het aanzuren van mest kan in potentie zowel aan de klimaatambities als aan PAS een bijdrage leveren.

Doel van deze studie is om een verkenning uit te voeren naar de innovaties op het gebied van goedkoop aanzuren van mest ter reductie van NH₃- en broeikasgasemissie uit mest. De deskstudie richt zich met name op het "Infarm systeem", een Deense techniek van aanzuren met zwavelzuur. Daarnaast zijn de ontwikkelingen rondom het biologisch aanzuren van mest bestudeerd, zoals nu in ontwikkeling is in Oostenrijk. Centraal daarbij staat hoe in Nederland optimaal kan worden ingespeeld op deze ontwikkelingen.

Aanzuren met zwavelzuur en de toepassing in het Infarm systeem

Het Deense bedrijf Infarm heeft het aanzuren van mest uitgewerkt tot een praktisch toepasbaar systeem om dunne mest in de stal automatisch aan te zuren met zwavelzuur (H₂SO₄) tot pH 5,5. Dit systeem wordt inmiddels op meer dan 80 bedrijven in Denemarken toegepast.

Potentie om bij te dragen aan Nederlandse klimaatdoelstellingen

Het aanzuren van mest tot pH 5,5 geeft een sterke afname in CH₄-emissie uit stal en opslag. De reductie van de N₂O-emissie na toedienen van aangezuurde mest lijkt beperkt. De weinige informatie die beschikbaar is geeft aan dat het hogere N-gehalte in mest door aanzuren (als gevolg van minder NH₃-emissie) bij toediening kan leiden tot zowel een hogere als een lagere N₂O-emissie uit de bodem. Een lagere NH₃-emissie, met als gevolg een besparing op kunstmest, leidt wel tot minder N₂O-emissie. Indien wordt aangenomen dat een kwart van de bedrijven (varkens en koeien) het Infarm systeem implementeert, kan door de reductie van de CH₄- en N₂O-emissie uit mest respectievelijk ongeveer 0,6 en 0,1 tot 0 Mton CO₂ equivalenten worden bespaard. Netto kan door aanzuren van mest met het Infarm systeem ruim 2% van de klimaatambitie voor overige niet-CO₂ broeikasgassen worden bereikt. Ook de doelstellingen afgesproken in het convenant 'Schone en zuinige agrosectoren' kunnen voor de melkveehouderijsector worden gerealiseerd.

Potentie om bij te dragen aan de reductie van de ammoniakemissie in Nederland

Alle onderzoeken waar de mest met H₂SO₄ wordt aangezuurd tot pH 5,5 laten een sterke reductie zien in NH₃-emissie uit stal (35%), opslag (90%) en bij toedienen (85%). Voor de Nederlandse melkveehouderij zijn 6 scenario's uitgewerkt; beperkt weiden en permanent opstallen voor 3 soorten rantsoenen (N-arm, gemiddeld, N-rijk). Uitgedrukt in kg N per dierplaats per jaar, resulteert aanzuren in een NH₃-emissiereductie uit de stal van 2,4 tot 3,8 kg N dier⁻¹ jr⁻¹. Dit is groter of vergelijkbaar met de emissiereductie die kan worden bereikt met de meeste emissiearme stallen. Na toedienen van de mest werkt het aanzuren positief door op de NH₃-emissie, waardoor deze daalt van 26% naar 4% van de in de mest aanwezige ammoniumstikstof. De daling met 53 tot 68% van de NH₃-emissie uit de gehele mestketen (vanaf stal tot en met toedienen) leidt tot een hoger N-gehalte van de mest bij toedienen. Hierdoor kan per hectare tussen 15 en 30 kg N bespaard worden op kunstmest-N.

Voor de Nederlandse varkenshouderij kan door aanzuren met het Infarm systeem de NH_3 -emissie uit de stal met gemiddeld $1 \text{ kg N dier}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ worden verlaagd ten opzichte van een standaard stal. Hiermee is het aanzuursysteem niet concurrerend met de huidige emissiearme varkensstallen. Door de ketenaanpak werkt het aanzuren echter ook positief door na toedienen van de mest. In totaal kan hierdoor de NH_3 -emissie met gemiddeld $2,1 \text{ kg N dier}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ worden verlaagd (een reductie van 50%).

Nadelen

Aanzuren van mest met H_2SO_4 kent een aantal nadelen en potentiële risico's. Dit betreft het veilig omgaan met sterk zuur en de mogelijke aantasting van beton door zwavelzuur. Door het toevoegen van H_2SO_4 aan mest wordt het S-gehalte in mest sterk verhoogd waardoor ook meer S op de bodem wordt gebracht ($125 - 175 \text{ kg S ha}^{-1}$). Deze hoeveelheid overschrijdt de hoeveelheid die door het gewas wordt opgenomen ($20 - 50 \text{ kg S ha}^{-1}$). Dit leidt tot extra uitspoeling van sulfaat naar oppervlakte- en grondwater en sulfaatiniveaus in grondwater die de streefwaarde van S (100 mg l^{-1}) benaderen.

Kosten

De kosten bij het Infarm systeem bestaan uit aanschaf- en onderhoudskosten, zuurverbruik, en kosten voor extra bekalking van gronden. Het systeem en het zuurverbruik zijn de belangrijkste kostenposten. Kostenbesparingen zijn mogelijk op de aankoop van kunstmest-N en -S, maar ook door N-arm te voeren, waardoor minder H_2SO_4 nodig is. Vanuit kostenperspectief is het systeem qua netto investering vergelijkbaar met de meerprijs voor emissiearme stallen in de melkveehouderij. In termen van NH_3 -emissie reductie zijn de kosten per kg NH_3 een stuk lager bij het Infarm systeem ($2,6-4,5 \text{ € kg}^{-1} \text{ NH}_3$) in vergelijking tot die van emissiearme stallen (minimaal $7,8 \text{ € kg}^{-1} \text{ NH}_3$). Wanneer de kosten worden uitgedrukt in € per bespaarde ton CO_2 equivalenten zijn de kosten voor het Infarm systeem door de reductie in CH_4 -emissie ($44-72 \text{ € ton}^{-1}$) van dezelfde orde van grootte als de te maken kosten voor het behalen van nationale klimaatdoelstellingen ($23-81 \text{ € ton}^{-1}$).

In de varkenshouderij is het Infarm systeem goedkoper dan het installeren van een luchtwassersysteem. Een kanttekening bij het Infarm systeem is dat de prijs voor H_2SO_4 sterk kan variëren. De aanschaf- en onderhoudskosten maken het systeem met name geschikt voor relatief grote bedrijven.

Biologisch aanzuren van mest en innovaties uit Oostenrijk

Het is mogelijk om mest biologisch aan te zuren door het bevorderen van de productie van zuren in mest door micro-organismen. Dit kan op verschillende manieren welke variëren in het, al dan niet in combinatie, toevoegen van:

1. een organisch zuur om de pH van de mest te verlagen om de juiste omstandigheden voor een specifieke (groep) micro-organismen te creëren;
2. een ent van een specifiek zuurproducerend micro-organisme;
3. een voedingsbron in de vorm van makkelijk fermenteerbare koolstof (C), bijvoorbeeld glucose;
4. micro-organismen of enzymen die in staat zijn macromoleculen af te breken tot substraten die als C-bron dienen voor de zuurproducerende bacteriën; of
5. colloïdaal materiaal waarop micro-organismen zich hechten, bijvoorbeeld zeoliet.

Het biologisch aanzuren van mest om de CH_4 -emissie te verminderen is een methode die zich nog in de onderzoeksfase bevindt. De resultaten zijn veelbelovend wat betreft de reductie van NH_3 -emissie uit de stal en bij toedienen. Het lijkt erop dat ook de methanogenese zeer sterk tot geheel wordt gereduceerd, zolang de pH van de mest onder pH 6 blijft. Verschillende studies laten echter zien dat in de loop van de tijd de pH van mest na biologisch aanzuren kan stijgen. Voordat de methode in de praktijk kan worden

geïmplementeerd dient een aantal fundamentele aspecten onderzocht te worden zoals:

- het inrichten en optimaliseren van procescondities via batch experimenten;
- het maken van een goede schatting van het effect van biologisch aanzuren op de netto emissie van broeikasgassen (CH₄, CO₂ en N₂O), gebaseerd op metingen;
- in hoeverre de mestkwaliteit te beïnvloeden is via de voeding, opdat het biologisch aanzuren beter verloopt met minder inzet van additieven; en
- wat het effect is van het toevoegen van een goedkope niet goed gedefinieerde C-bron op mestkwaliteit en bodem, omdat door deze goedkope voedingsbron ook andere (ongewenste) componenten, zoals zware metalen en voedingsstoffen, aan de mest en bodem kunnen worden toegevoegd.

Potentie en kosten

De te behalen emissiereductie met biologisch aanzuren of aanzuren met organisch zuur wordt vooral bepaald door het pH-niveau en verschilt in principe niet van die met anorganisch zuur. Dit geldt naar verwachting ook voor de broeikasgasemissiereductie. Het zuurverbruik wordt sterk bepaald door de versheid van de mest. Bij verse mest is minder zuur nodig en is het zelf verzurend potentieel groter vanwege meer gemakkelijk afbreekbare C.

De kosten van het systeem worden vooral bepaald door de hoeveelheid en de prijs van de additieven die nodig zijn. Deze kunnen beduidend hoger zijn dan die van het Infarm systeem. Prioriteit ligt dan ook bij onderzoek naar optimalisering van de procescondities.

Ontwikkelingsperspectief voor Nederland

- Een aanzuursysteem dat geheel gebaseerd is op biologisch aanzuren is voor de langere termijn het meest perspectiefvol. Voor de korte termijn kan waarschijnlijk het best worden ingezet op een mix van biologisch en anorganisch aanzuren, vanuit oogpunt van risicospreiding tussen de kosten voor inzet van hulpmiddelen (azijnzuur, C-bronnen en zwavelzuur).
- Technisch onderzoek naar het inrichten en optimaliseren van de procescondities voor biologisch aanzuren is nodig om de rentabiliteit en de milieubaten te optimaliseren. Dit is bepalend voor de implementatie kansen.
- Op (de langere) termijn kan men zich richten op systeemonderzoek (vanaf de veevoeding tot en met de mestproductie) om biologisch aanzuren verder door te ontwikkelen.

Conclusies

- Aanzuren van mest in de stal met zwavelzuur tot pH 5,5 met het Infarm systeem heeft de potentie een kosteneffectieve manier te zijn om bij te dragen aan NH₃-emissiereducties (50-70% reductie), de klimaatambitie overige niet-CO₂ broeikasgassen (2% reductie bij roepassing op een kwart van de bedrijven) en het behalen van doelstellingen afgesproken in het convenant 'Schone en zuinige agrosectoren' voor de melkveehouderijsector.
- Met het Infarm systeem is het aanzuren van mest in een implementeerbaar stadium. Het belangrijkste nadeel is dat relatief veel zwavel aan de mest en daarmee ook aan de bodem wordt toegevoegd.
- Het biologisch aanzuren van mest lijkt een perspectiefvolle methode om mest aan te zuren en zo NH₃- en broeikasgasemissies te reduceren, maar vergt nog nader onderzoek gericht op de procescondities voordat deze in de praktijk kan worden geïmplementeerd tegen acceptabele kosten.
- Voor de langere termijn lijkt het biologisch aanzuren van mest het meest perspectiefvol.

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Voor het Ministerie van Infrastructuur en Milieu voert Agentschap NL projecten uit die moeten leiden tot de reductie van niet-CO₂ broeikasgassen (algemeen bekend onder de naam ROB: Reductieprogramma Overige Broeikasgassen). In Nederland draagt de landbouw voor ongeveer 9% bij aan de totale uitstoot van broeikasgassen (Maas et al., 2010). Deze bijdrage wordt met name veroorzaakt door de gassen lachgas (N₂O) en methaan (CH₄). N₂O komt vooral vrij uit de bodem na toedienen van (kunst)mest en bij afbraak van organisch stof. Methaan komt vooral vrij bij pensfermentatie in de koe (70%) en uit dierlijke mest (30%). De landbouw heeft geen kwantitatieve doelstelling gekregen bij de start van het ROB, maar wel een kwalitatieve. Deze doelstelling luidt: het implementeren van kosteneffectieve maatregelen in de praktijk. In het convenant “Schone en Zuinige agrosectoren” is tussen Rijk en de sector afgesproken de uitstoot van overige broeikasgassen te reduceren met 4 tot 6 Mton ten opzichte van 1990. Het ROB is geïnteresseerd naar ontwikkelingen die van belang zijn voor de emissiereductie van niet-CO₂ broeikasgassen en naar mogelijke nieuwe maatregelen die praktisch toepasbaar en kosteneffectief zijn. Aanzuren van mest is een optie om de CH₄-emissie uit mest sterk terug te dringen. Mogelijk heeft aanzuren van mest ook effect op de emissie van N₂O uit de bodem na toedienen.

De methode om mest aan te zuren is oorspronkelijk ontwikkeld om de ammoniakemissie (NH₃-emissie) te verminderen, zowel uit stallen, uit opslag als bij toedienen. In tegenstelling tot de varkenshouderij waren tot nu toe, voor melkveebedrijven weinig mogelijkheden om de ammoniakemissie uit stallen te verlagen. In het kader van de programmatische aanpak stikstof (PAS) zijn op dit moment meerdere initiatieven om ook de NH₃-emissies uit melkveestallen te reduceren. Met name in de buurt van Natura 2000 gebieden, is het zeer gewenst om op melkveebedrijven de NH₃-emissie te reduceren om bedrijfsvergroting mogelijk te maken. Ongeveer de helft van de Nederlandse melkveehouderijen staan in de buurt van Natura 2000 gebieden. Deze bedrijven mogen alleen uitbreiden als dit niet leidt tot extra NH₃-emissies.

Ondanks uitgebreid onderzoek en positieve resultaten wat betreft een reductie in NH₃-emissies uit mest heeft het aanzuren van mest tot voor kort niet geleid tot een methode of techniek die praktisch toepasbaar is. De toenemende druk om naast de NH₃- ook broeikasgasemissies te reduceren en de positieve resultaten van aanzuren op de emissie van broeikasgassen uit mest, heeft tot een nieuwe impuls geleid in het onderzoek naar, en het ontwikkelen van methodes en technieken om mest aan te zuren.

Recent is in Denemarken door het bedrijf Infarm een technologie ontwikkeld waarbij mest automatisch wordt aangezuurd met zwavelzuur. Dit systeem is in Denemarken een geaccepteerde methode om de NH₃-emissie te reduceren (Kai et al. 2008) en wordt op ruim 80 bedrijven toegepast.

Behalve door middel van een anorganisch zuur kan mest ook op andere manieren worden aangezuurd. Biologisch aanzuren bijvoorbeeld is er op gericht om bepaalde zuurproducerende micro-organismen in mest te stimuleren. Door recent onderzoek en ontwikkelingen in bijvoorbeeld Oostenrijk door Wenzl et al. (2009) en Somitsch et al. (2008) biedt biologisch aanzuren ook perspectief om in de praktijk te kunnen worden toegepast.

1.2 Doelstelling

Doel van de studie is om in opdracht van Agentschap NL een verkenning uit te voeren naar de innovaties op het gebied van goedkoop aanzuren van mest ter reductie van NH_3 - en broeikasgasemissies uit mest. De verkenning van de perspectieven richt zich met name op ontwikkelingen met betrekking tot het "Infarm systeem" en de meer innovatieve ontwikkelingen waarbij mest biologisch wordt aangezuurd. Centraal daarbij staat hoe in Nederland optimaal kan worden ingespeeld op deze ontwikkelingen.

In deze studie worden daarom de volgende vragen beantwoord:

1. Wat is het perspectief van het Deense Infarm systeem voor de Nederlandse situatie? Hierbij wordt gekeken naar de kosten, de effecten op CH_4 , N_2O en NH_3 -emissies en de effecten op andere duurzaamheidsaspecten (specifiek sulfaat, knelpunten). Daarnaast wordt ook ingegaan op de veranderingen in mestsamenstelling sinds onderzoeken vorige eeuw, en de invoering van de bedrijfsspecifieke excretie (BEX), waardoor mogelijk veel minder zuur nodig is dan destijds.
2. Wat zijn andere (innovatieve) systemen om mest aan te zuren, bijvoorbeeld hoe werkt men in het Oostenrijkse project aan biologisch aanzuren van mest en wat zijn de perspectieven voor Nederland? Er wordt daarbij ingegaan op de kosten, de effecten op CH_4 , N_2O en NH_3 -emissies en het effect op andere duurzaamheidsaspecten. Aangegeven zal worden welke kansen en knelpunten te verwachten zijn voor de Nederlandse situatie.
3. Op welke wijze kan ROB / de Nederlandse overheid in spelen op deze ontwikkelingen als deze positief lijken te zijn of positief lijken te zijn om te buigen voor het snel en op goede wijze implementeren van de aanzuurtechniek.

2 Achtergrond aanzuren mest

2.1 Broeikasgasemissie uit landbouw

De landbouw levert een belangrijke bijdrage aan de emissie van de broeikasgassen CH₄ en N₂O. Hoewel de uitstoot van CH₄ en N₂O vele malen lager is dan CO₂, zijn deze gassen in vergelijking tot CO₂ sterkere broeikasgassen. Het CO₂ equivalent van CH₄ is 25 en van N₂O 298 (IPCC/TEAP 2005). In Tabel 1 is een overzicht gegeven van de belangrijkste bronnen van broeikasgasemissies in de landbouw.

Ten opzichte van de totale broeikasgasemissie is het aandeel van de landbouw slechts 9%. De grootste bijdrage aan deze broeikasgasemissie wordt veroorzaakt door de directe emissie van N₂O uit de bodem en de CH₄-emissie bij pens fermentatie bij runderen. Van de totale emissie van CH₄ en N₂O wordt respectievelijk 54% en 80% veroorzaakt door de landbouw.

Zowel CH₄ als N₂O komen vrij uit mest; 3,6 Mton CO₂ eq. uit de stal (CH₄ + N₂O) en nog eens 4,8 Mton CO₂ eq. als directe N₂O-emissies uit de bodem na toedienen (Tabel 1). De emissies zijn gerelateerd aan de hoeveelheid en samenstelling van de mest, het type mest management systeem en omstandigheden.

Tabel 1.: Bijdrage van de belangrijkste bronnen van broeikasgasemissies in de landbouw in 2008 (Maas et al., 2010).

Bronnen	Gas	Emissies		Bijdrage aan totaal in 2008 (%)		
		Mton CO ₂ eq	Per bron	Per gas	Totale CO ₂ eq	
Landbouw	CH ₄	9,1	49	100	4,4	
	N ₂ O	9,4	51	100	4,5	
	Totaal	18,5	100		8,9	
Pens fermentatie	Totaal CH ₄	6,5	35	71	3,1	
Runderen	CH ₄	5,8	31	64	2,8	
Varkens	CH ₄	0,4	2	4	0,2	
Andere dieren	CH ₄	0,3	2	3	0,1	
Mest management (emissie vanuit de stal)	CH ₄	2,7	14	30	1,3	
	N ₂ O	0,9	5	10	0,4	
	Totaal	3,6	19		1,7	
Runderen	CH ₄	1,5	8	16	0,7	
Varkens	CH ₄	1,1	6	12	0,5	
Kippen	CH ₄	0,1	0	1	0,0	
Andere dieren	CH ₄	0	0	0	0,0	
Landbouwgronden	Totaal N ₂ O	8,5	46	90	4,1	
Directe emissie uit de bodem	N ₂ O	4,8	26	51	2,3	
Dier productie op landbouwgronden	N ₂ O	0,6	3	6	0,3	
Indirecte emissies	N ₂ O	3	16	32	1,4	
Totale nationale broeikasgasemissies	CH ₄	17,1				
	N ₂ O	11,8				
	Totaal	206,9			100	

CH₄-emissie

Voor CH₄-emissie zijn twee bronnen belangrijk; pensfermentatie (70%) en emissie uit mest (30%). Pensfermentatie is met name van belang bij koeien. Van de emissie uit mest komt iets meer dan de helft van de CH₄-emissie uit koeienmest (1,5 Mton) en 1,1 Mton uit varkensmest (Tabel 1). De emissie van CH₄ uit mest komt overeen met ongeveer 1,3% van de totale broeikasgasemissie (206,9 Mton CO₂ eq.).

Methaan wordt geproduceerd door methaanvormende bacteriën die vluchtige vetzuren afbreken. De vluchtige vetzuren worden gevormd door afbraak van organisch materiaal. In mest wordt de vorming van CH₄ door de afbraak van organisch stof beïnvloed door temperatuur, zuurgraad, verblijftijd en afbreekbaarheid van het organisch materiaal (Van Dooren & Smits 2007). Voor de afbraak moeten de omstandigheden anaeroob (geen zuurstof) zijn. Daarom is emissie uit mest vooral van toepassing uit de stal en opslag en niet uit de bodem (Tabel 1). Langere opslagtijden en hogere temperaturen verhogen de CH₄-emissie in vergelijking met korter opslagtijden en lagere temperaturen.

N₂O-emissie

Een relatief klein gedeelte van de N₂O-emissie komt vrij uit mest uit stallen (10%, Tabel 1). Voor N₂O is met name de emissie uit de bodem belangrijk (90%). Hiervan wordt meer dan de helft veroorzaakt door de directe emissie van N₂O uit de bodem. De directe N₂O-emissie is het gevolg van het toedienen van dierlijke mest en kunstmest en van dierlijke mest die in de weide is geproduceerd.

Lachgas komt vrij als bijproduct van nitrificatie en denitrificatie reacties. De belangrijkste factoren die de N₂O-emissie uit bemeste landbouwgronden bepalen zijn de grootte van de mestgift, de soort en samenstelling van de mest, het tijdstip en methode van toediening, het vochtgehalte van de bodem (beïnvloed door neerslag, verdamping, bodemtype, gewas en waterbeheer), de temperatuur, de N-opname door het gewas en een eventueel wintergewas en het volggewas (Velthof et al., 2000). In principe neemt de N₂O-emissie toe met toenemende N-bemesting. Hoe hoger het N-gehalte van de mest en hoe langer de mest in de bodem verblijft voordat het wordt opgenomen door het gewas hoe hoger de N₂O-emissie. Voor management keuzes om opbrengst- en milieudoelstellingen te combineren is het zinvoller om N₂O-emissies te relateren aan de N opname efficiëntie van het gewas dan aan de hoeveelheid N die met (kunst)mest op het land wordt gebracht (Van Groenigen et al., 2010). Bij toedienen is de N₂O-emissie afhankelijk van de manier waarop de mest wordt toegediend. Clemens et al. (1997) vinden geen relatie tussen NH₃- en N₂O-emissie bij toedienen waardoor een reductie in de NH₃-emissie niet hoeft te leiden tot een af- of toename in de N₂O-emissie (Clemens et al., 1997). Kuikman et al. (2006) vinden dat het toedienen van mest met technieken die zorgen voor een lagere NH₃-emissie leiden tot hogere N₂O-emissies.

2.2 NH₃-emissie

Wereldwijd is de totale NH₃-emissie voor ongeveer 50% toe te schrijven aan de landbouw (Schlessinger & Hartley, 1992 in Sommer & Hutchings, 2004). In Nederland is dit door de intensieve veeteelt ongeveer 90% van de totale emissie. De depositie van NH₃ kan verzuring en eutrofiering van natuurlijke ecosystemen veroorzaken (Schulze et al., 1989 in Sommer et al., 2004). Voor boeren is het ook een nadeel dat door de vervluchtiging van NH₃, N verloren gaat uit mest waardoor het N-bemestingspotentieel afneemt en varieert. Dit heeft effect op de hoeveelheid kunstmest die nodig is om het gewas optimaal te voorzien in N.

In 2010 bedroeg de emissie uit de landbouw ongeveer 114 mln. kg NH₃ (Hoogeveen et al., 2010). In

dezelfde studie wordt berekend dat door een toename in het gebruik van emissiearme stallen en het toedienen van dierlijke mest in 2020 deze emissie zal dalen tot 100 mln. kg NH_3 ($\pm 5\%$). Het overgrote deel van de totale NH_3 -emissie uit landbouw komt vrij uit dierlijke mest (90%) en een klein gedeelte uit het gebruik van kunstmest (10%). Van de emissie uit dierlijke mest vormen de emissie uit stallen (52%) en het aanbrengen van mest op het land (34%) de grootste bijdragen. De bijdragen van beweiden (7%) en opslag (5%) aan de totale emissie zijn gering (Hoogeveen et al., 2010).

Ammoniakemissie uit stallen is afhankelijk van het type vloer, of er gebruik wordt gemaakt van een mestschuif en hoe de mest wordt behandeld. Voor melk- en kalfkoeien wordt uitgegaan van een standaard stalemissie van 7,8 – 9,1 kg N $\text{dier}^{-1} \text{jr}^{-1}$ afhankelijk van beweiden of permanent opstallen (Rav, Appendix 2). Bij een gemiddelde emissiearme stal wordt dit verlaagd tot 6,6 $\pm$ 0,7 kg N $\text{dier}^{-1} \text{jr}^{-1}$. In één van de gecertificeerde systemen wordt verwacht dat de emissie verlaagd kan worden tot 3,4 – 3,9 kg N $\text{dier}^{-1} \text{jr}^{-1}$.

Voor varkens bedraagt emissie 2,5 – 3,3 kg N $\text{dier}^{-1} \text{jr}^{-1}$, Rav. In emissiearme stallen waar de vloer of mestkelder is aangepast kan deze NH_3 -emissie worden verlaagd tot gemiddeld 1,1 $\pm$ 0,4 kg N $\text{dier}^{-1} \text{jr}^{-1}$ (Rav). In emissiearme stallen waar luchtwassers worden toegepast wordt dit nog verder verlaagd tot gemiddeld 0,5 $\pm$ 0,2 kg N $\text{dier}^{-1} \text{jr}^{-1}$ (Rav). In de varkenshouderij zijn dus al grote reducties in NH_3 -emissie bereikt door emissiearme stallen. Op dit moment zijn veel ontwikkelingen gaande om ook voor de melkveehouderij door stalaanpassingen de NH_3 -emissie uit de stal te reduceren (Van Dooren & Smits, 2007). De motivatie hiervoor is de restrictie voor melkveebedrijven in de buurt van Natura 2000 gebieden om uit te breiden op basis van de uitstoot van NH_3 . Het bouwen van emissiearme stallen kan behoorlijke kosten met zich meebrengen. De kosten voor een aangepaste vloer (100 – 165 € m^{-2}) zijn bijvoorbeeld aanzienlijk hoger dan voor een traditionele vloer (35 € m^{-2}).

De NH_3 -emissie na het toedienen van de mest is sterk afhankelijk van de manier waarop de mest op het land wordt gebracht. Sinds begin jaren negentig is het verplicht om mest emissiearm toe te dienen op grasland. Dit is voor bouwland al sinds 1988 verplicht. Bij emissiearm toedienen op grasland daalt de NH_3 -emissie van de totaal toegediende ammoniakale N (TAN) van 74% bij breedwerpig toedienen naar 26% bij de sleepvoetenmethode en naar 16% bij ondiepe injectie. Op bouwland daalt deze van 69% bij bovengronds toedienen naar 22% bij inwerken en 2% bij volledig bedekken (Huijsmans & Vermeulen, 2008). Volledig bedekken is rechtstreekse injectie (één werkgang) of direct inwerken met de ploeg. Behalve van de methode van toedienen is de NH_3 -emissie ook afhankelijk van de weersomstandigheden bij toedienen (temperatuur, windsnelheid, vochtigheid) en bodem eigenschappen (calcium gehalte, zuurgraad en kationomwisselcapaciteit) en rantsoensamenstelling (Bussink & Oenema, 1998 en Sommer et al., 2004).

2.3 Aanzuren mest

Vanuit de huidige Nederlandse klimaatambities bestaat het streven naar een reductie van de overige niet- CO_2 broeikasgassen met 25-27 Mton CO_2 equivalenten in 2020. In het convenant 'Schone en zuinige agrosectoren' zijn voor de landbouwsector per sector specifieke afspraken verwoord over de reductie van overige broeikasgassen. Daarnaast is de overheid bezig met het opstellen van een programmatische aanpak stikstof (PAS) om de doelen voor Natura 2000 gebieden te realiseren door onder andere een daling van de NH_3 -emissie vanuit landbouwbedrijven in de buurt van Natura 2000 gebieden (Anonymus, 2010; de Groot & de Bruin, 2011). Het aanzuren van mest kan in potentie zowel aan de klimaatambities als aan PAS een bijdrage leveren.

2.3.1 Achtergrond

Het aanzuren van mest is ontwikkeld om de NH_3 -emissie uit mest te reduceren. Ammoniakemissie vindt plaats na een aantal reacties in mest. Eerst vindt een snelle omzetting van vooral ureum naar $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ plaats. Dit product dissocieert vrij gemakkelijk waarbij ammonium en (bi)carbonaat in oplossing komen. De ammonium (NH_4^+) in mest is in evenwicht met ammoniak (NH_3) door middel van de reactie:



Ammoniak in de mest is weer in evenwicht met NH_3 in de gasfase. Zoals blijkt uit de proton (H^+) in vergelijking 1, is de reactie waarin ammonium wordt omgezet in ammoniak pH afhankelijk. Door een daling van de pH (veel H^+) verschuift de reactie naar relatief weinig NH_3 en bij hoge pH verschuift deze naar meer omzetting van NH_4^+ naar NH_3 . In mest is de pH van nature relatief hoog (tussen 6,5 en 8). Door aanzuren worden protonen aan het systeem toegevoegd en zal de reactie verschuiven naar links verschuiven, waardoor de ammoniakdampdruk afneemt.

Al in het begin van de 20^{ste} eeuw zijn de eerste studies uitgevoerd naar de mogelijkheid om NH_3 -emissies te reduceren door mest aan te zuren (Jensen, 1928, Egnér, 1932 in Husted et al., 1991). Sindsdien zijn er vele studies uitgevoerd. In Nederland nam het onderzoek een vlucht eind jaren 80 – begin jaren 90 van de vorige eeuw (Bussink 2009). Hierbij richtte het onderzoek zich met name op het aanzuren met salpeterzuur. Dit systeem werd echter door de Nederlandse overheid begin jaren negentig niet geaccepteerd. De belangrijkste reden was de controleerbaarheid in het veld, het risico van hoge N giften en een toename in N_2O -emissies door een verhoogde denitrificatie (Berg et al., 2006, Oenema & Velthof, 1993).

Internationaal is het meeste onderzoek uitgevoerd naar het aanzuren van mest door middel van het toevoegen van een anorganisch zuur. De laatste jaren heeft een verschuiving plaatsgevonden van het gebruik van salpeterzuur (HNO_3) naar het gebruik van zwavelzuur (H_2SO_4). Mest kan echter op verschillende manieren worden aangezuurd. Hieronder volgt een overzicht gebaseerd op onder anderen Van Dooren & Smits (2007):

1. het toevoegen van een anorganisch zuur zoals zoutzuur (HCl), salpeterzuur (HNO_3) of zwavelzuur (H_2SO_4);
2. het toevoegen van base-neerslaande zouten zoals CaCl_2 , (Jensen, 1928 en Egnér, 1932 in Husted et al., 1991);
3. het enten met en/of stimuleren van specifieke micro-organismen die organische zuren produceren zoals melkzuur of azijnzuur. Het stimuleren van deze micro-organismen kan door een makkelijk afbreekbaar koolstofbron toe te voegen. Dit systeem wordt biologisch aanzuren genoemd;
4. het toevoegen van een organisch zuur. Dit is echter relatief duur en de zuren worden afgebroken. Dit kan wel worden gebruikt om biologisch aanzuren op gang te helpen;
5. van het rantsoen van het dier het aanpassen, waardoor de samenstelling en pH van de urine en de faeces wordt beïnvloed (Van Dongen et al., 2006). Het totale effect is wellicht niet groot maar in combinatie met optie 1 en 3 mogelijk interessant; en
6. het toevoegen van additieven (bijvoorbeeld benzoëzuur in de varkenshouderij) aan het veevoer. Dit is relatief moeilijk controleerbaar en handhaafbaar. Het totale effect is wellicht ook niet zo groot;

Een overzicht van de behaalde resultaten met het aanzuren van mest wordt in Tabel 2 gepresenteerd. Tabel 2 laat zien dat het aanzuren van mest een duidelijk positief effect heeft op het reduceren van de NH_3 -emissie, zowel in de stal als bij het toedienen van de mest op het veld.

Een overzicht van het gebruik van base-neerslaande zouten is opgenomen in Appendix 2.

2.3.2 Voor- en nadelen aanzuren mest

Naast een sterke reductie in de NH_3 -emissie heeft het aanzuren van mest nog een aantal voordelen. Onderzoek heeft uitgewezen dat aanzuren ook de CH_4 -emissie sterk reduceert (Oenema & Velthof 1993, Berg et al., 2006, Ottosen et al., 2009). Het is mogelijk dat aanzuren de directe N_2O -emissie uit de bodem ook reduceert. Het meest opvallende van het aanzuren van mest is dat het een ketenaanpak is. Het aanzuren van mest in de stal reduceert NH_3 -emissies uit de stal maar werkt ook positief door in de volgende stappen in de mestketen – opslag en toedienen. Ook heeft de behandelde mest een hoger N-gehalte en een betere mestwaarde ten opzichte van onbehandelde mest omdat bij een reductie in de NH_3 -emissie meer N in de mest achter blijft. Hierdoor kan ook de kunstmestgift worden verlaagd of zelfs mogelijk achterwege blijven.

Aanzuren van mest kent echter ook een aantal nadelen. Deze kunnen worden gecategoriseerd naar milieueffecten, veiligheid, kosten en uitvoering.

- Milieu
 - Om mest aan te zuren worden additieven aan de mest toegevoegd. Deze kunnen mogelijk nadelige effecten hebben of nadelig doorwerken op het milieu
 - De productie van anorganische zuren is belastend voor het milieu.
- Veiligheid
 - Het gebruik van sterke anorganische zuren op het bedrijf verhoogt het risico van calamiteiten (Borst, 1991)
- Kosten
 - Door de lagere pH van de aangewende mest zal ook extra bekalkt moeten worden om de pH van de bodem te handhaven (Bussink, 2009)
- Praktische uitvoering
 - Moeilijk om een goede homogene menging van mest met zuur te bereiken (Van Lent, 1993)
 - Schuinvorming bij toevoegen zuur aan mest

Per methode van aanzuren zijn ook een aantal specifieke voor- en nadelen. Deze zullen voor de in dit rapport behandelde systemen apart worden besproken.

2.3.3 Recent onderzoek

Aan het eind van de vorige eeuw zijn meerdere onderzoeken uitgevoerd naar het aanzuren van mest om zo de NH_3 -emissie uit mest te verminderen. Hoewel het proces werkt, waren de nadelen van aanzuren groter dan de voordelen. Recent zijn er nieuwe ontwikkelingen die de nadelen geheel of gedeeltelijk opheffen. In Denemarken is door het bedrijf Infarm een praktisch toepasbare technologie ontwikkeld. De belangrijkste aanpassing is het type zuur dat wordt gebruikt. Deze is aangepast van salpeterzuur naar zwavelzuur. Verder zorgt het systeem voor een goede menging van mest en zuur.

Behalve het gebruik van een anorganisch zuur is in de negentiger jaren onderzoek gedaan naar biologisch aanzuren in een varkensstal (Hendriks & Vrielink, 1997). Dat bleek toen te duur te zijn. Er is zelfs een patent gepubliceerd op een bepaalde vorm van biologisch aanzuren (Lameijer & Vervoort, 1995). Recent is er door Clemens & Wulf (2005) en in Oostenrijk door Wenzl et al. (2009) en Somitsch et al. (2008) onderzoek uitgevoerd naar biologisch aanzuren. Dat bleek perspectiefvol en in 2011 wordt het Oostenrijks onderzoek op grotere schaal voortgezet. Dit onderzoek richt zich onder andere op de mogelijkheid om mest biologisch aan te zuren door het stimuleren van bepaalde zuurproducerende

micro-organismen in mest, zo mogelijk zonder toevoegmiddelen.

Het is van groot belang dat aanzuren zo effectief mogelijk en tegen lage kosten gebeurd. Daarbij mag het ook niet leiden tot afwenteling. Om een goede afweging te maken over de toepasbaarheid van een systeem waarbij mest wordt aangezuurd moeten per systeem de voor- en nadelen en kosten- en opbrengsten duidelijk in kaart worden gebracht alsmede de hiaten in de bestaande kennis. In de volgende hoofdstukken zal dit worden uitgewerkt voor het Deense Infarm systeem (H3) en voor biologisch aanzuren, zoals bijvoorbeeld het systeem waar in Oostenrijk aan gewerkt wordt (H4). Hierbij zullen de tot nu toe gevonden resultaten worden toegepast op de Nederlandse situatie.

Tabel 2. Overzicht van de resultaten zoals beschreven in de literatuur in reductie van NH₃-emissie (%) van aangezuurde mest ten opzichte van niet behandelde mest.

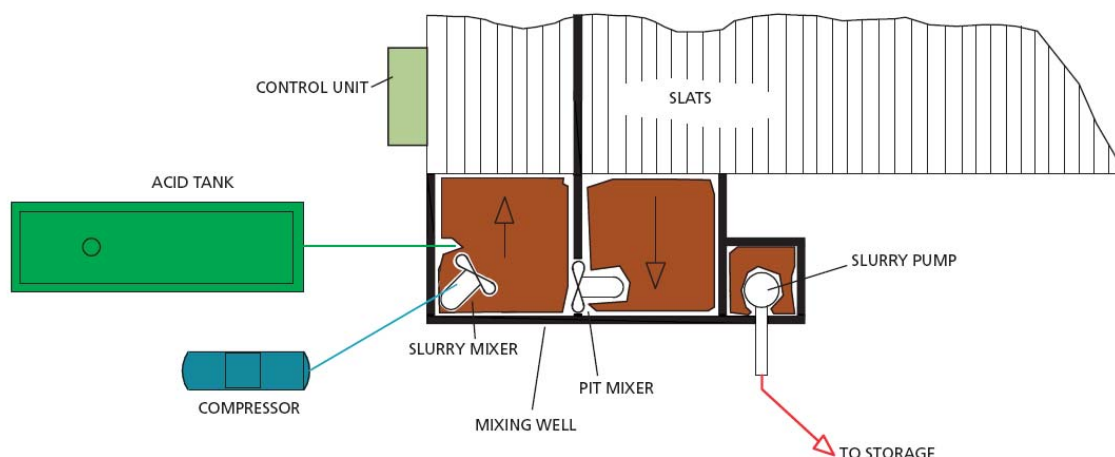
Referentie	Studie	Mest	Toegevoegd zuur		pH	Toedienen	CH ₄	Reductie NH ₃ -emissie (%)			Toename MFE [^] %
			Type	hoeveelheid				stal	Veld	Tot.	
Stevens et al., 1989	Lab/veld	Koe	H ₂ SO ₄ (18 M)	37 kg ton ⁻¹	5,5	Breed ^^		35 – >99 27 – 87	95		
		Varken	H ₂ SO ₄ (18 M)	20 kg ton ⁻¹	6					82	
Pain et al., 1990	Veld	Koe	H ₂ SO ₄ (2M)	30-85 ml l ⁻¹	5,5					14-57	
Husted et al., 1991	Lab	Koe	HCl	80-320 meq l ⁻¹ *							
			CaCl ₂	80-400 meq l ⁻¹ *							
Bussink et al., 1994	Veld	Koe	HNO ₃ (14M)		4,5				85		
					5				72		
					6				55		
Clemens et al., 2002	Lab / veld	Koe	glucose	0,1 mol l ⁻¹	5.9				<20 hrs: 81		
									Total: 41		
Berg et al., 2006	Lab	Koe	HNO ₃ (50%)	1; 1,3; 1,5 vol%	5,7; 5,1; 4,2		17-75	29 – 71			
			Melkzuur (50%)	2; 4; 6 vol%	5,2; 4,5; 3,9		91-98	65 – 88			
Kai et al., 2008	Veld	Varken	H ₂ SO ₄ (18 M)	5 kg H ₂ SO ₄ ton ⁻¹	<6,3	Rij		70	67	72	43
Bussink, 2009	Desktop	Koe	H ₂ SO ₄ (18 M)	11 kg H ₂ SO ₄ ton ⁻¹	5,5	Sleepvoet		35	84	67	
						Injectie		35	84	61	
Sørensen & Eriksen, 2009	Veld	Koe	H ₂ SO ₄ (18 M)	5,2 kg H ₂ SO ₄ ton ⁻¹	5,5	Injectie					0
						Sleepslangen					39-63
		Varken	H ₂ SO ₄ (18 M)	10 kg H ₂ SO ₄ ton ⁻¹	5,5	Injectie					0
						Sleepslangen					74-101

* total acidity of the slurry was 340 meq l⁻¹[^] MFE staat voor ' mineral fertilizer equivalent' en is gedefinieerd als de hoeveelheid kunstmest- N die nodig is om dezelfde opbrengst te bereiken als 100 kg organische mest- N (Kai et al. 2008).^{^^} Mest werd vlak voor toedienen aangezuurd in een speciaal aangepaste machine

3 Aanzuren door middel van het Infarm systeem

3.1 Achtergrond

In Denemarken is door het bedrijf Infarm een technologie ontwikkeld waarbij mest wordt aangezuurd met zwavelzuur. Het Infarm systeem gebruikt het aanwezige ringkanaal systeem voor de mestopslag onder de roostervloer in de stal. Daarbij wordt de mest in een aparte tank automatisch aangezuurd tot pH 5,5, belucht en gehomogeniseerd (Figuur 1). In Denemarken geeft dit systeem zeer positieve resultaten met betrekking tot het reduceren van de ammoniakemissie en de uitstoot van methaan. Het systeem is op dit moment op zo'n 80 bedrijven in Denemarken geïmplementeerd.



Figuur 1: Schematische weergave van het aanzuren van mest door middel van het Deense Infarm systeem.

In een bedrijfsbrede benadering laat Kai et al. (2008) zien dat met het Infarm systeem de NH_3 -emissie in de stal met 70% afneemt, uit de opslag met 88% en bij het uitrijden van de mest met 67% afneemt. In totaal is de reductie in NH_3 -emissie 72% voor de onderzochte varkensboerderij. Een bijkomend voordeel was dat het N-gehalte van de mest toenam van $1,46 \text{ kg N m}^{-3}$ in onbehandelde mest naar $2,55 \text{ kg N m}^{-3}$ met aanzuren, hierbij was het initiële N-gehalte van de mest $3,15 \text{ kg N m}^{-3}$. Ook was de variabiliteit in het N-gehalte van de mest bij uitrijden van de aangezuurde mest veel lager vergeleken met de onbehandelde mest.

Meerdere studies hebben aangetoond dat behalve de NH_3 -emissie ook de CH_4 -emissie sterk afneemt of zelfs helemaal wordt stilgezet bij aanzuren van de mest (Oenema & Velthof, 1993, Ottosen et al., 2009). Hoewel de resultaten niet eenduidig zijn, lijkt aanzuren mogelijk ook een effect te hebben op N_2O -emissies. In de volgende paragrafen zullen de emissiereducties verder worden uitgewerkt gericht op de Nederlandse situatie.

3.2 Voor- en nadelen aanzuren mest met Infarm systeem

Bij het Infarm systeem wordt zwavelzuur (H_2SO_4) gebruikt om de mest aan te zuren. In de meeste vroegere studies werd salpeterzuur (HNO_3) gebruikt om aan te zuren. Het gebruik van H_2SO_4 heeft een aantal voordelen ten opzichte van het gebruik van HNO_3 (Bussink, 2009):

- De streef-pH bij aanzuren is minder laag (pH 5,5) dan bij aanzuren met HNO_3 (4,0 – 4,5) waardoor minder zuur nodig is. Ook is er geen extra zuur nodig om de pH op een bepaalde lage waarde vast te houden. Bij het gebruik van HNO_3 was de lage pH nodig om denitrificatie tot stilstand te brengen

(Van Lent, 1993). De pH van de mest is stabiel met aanzuren met H_2SO_4 omdat geen denitrificatie optreedt.

- Na uitrijden van de mest is minder kalk nodig om te compenseren voor het verzurende effect van de mest op de bodem.
- Het mixen van het zuur met de mest gaat veel beter omdat het aanzuren buiten de stal plaatsvindt (Figuur 1).
- Door het toegevoegde sulfaat is geen zwavelbemesting meer nodig.

Het gebruik van H_2SO_4 kent echter ook een aantal potentiële nadelen:

- De hoeveelheid zwavel (S) die op het land wordt gebracht is hoger dan de behoefte van het gewas (2-50 kg S ha⁻¹). Dit leidt weer tot een verhoging van sulfaatgehalten in het grondwater. Verwacht wordt dat dit niet leidt tot overschrijdingen van de streefwaarde van S (100 mg l⁻¹), maar deze wordt wel benaderd (Bussink 2009). Een hoge aanvoer van S werkt ook nadelig op de spoorelementen voorziening van rundvee (Bussink et al., 2007).
- Een hoge aanvoer van zwavel werkt nadelig op de spoorelementen voorziening van rundvee.
- Er bestaat onzekerheid of het beton van vloeren onder dichte kelders en kanalen en opslagtanks wordt aangetast door de hoge S-concentraties. Voor nieuwe beton soorten met hoog vliegashalte worden geen problemen verwacht (Sørensen & Eriksen, 2009).
- Stankoverlast kan ontstaan door een verhoogde concentratie van vluchtige vetzuren, met name boterzuur (Sørensen & Eriksen, 2009; Ottosen et al., 2009). Het is ook mogelijk dat de hoge S-concentraties leiden tot stankoverlast door het vrijkomen van vluchtige S-verbindingen. Dit dient nader onderzocht te worden. In een studie door Kai et al. (2008) werd geen significant verschil in de geur van aangezuurde en onbehandelde mest waargenomen, wel werd geconstateerd dat de mest anders rook. In Denemarken is bovengronds toedienen beperkt tot een minimale afstand van 200-300 m van woningen in verband met de andere geur van de aangezuurde mest door vluchtige vetzuren.
- Het gebruik en omgaan met sterk zuur moet gebeuren volgens strikte veiligheidsprotocollen om risico's op calamiteiten te voorkomen (Clemens et al., 2002). Behalve directe calamiteiten door de aanwezigheid van een sterk zuur kunnen ook indirect risico's ontstaan door de productie van het giftige H_2S gas. Ottosen et al. (2009) vonden géén toename in de productie van vrij sulfides in mest door aanzuren met H_2SO_4 tot pH 5,5. In Denemarken zijn in de praktijk ook geen problemen met H_2S .

3.3 Hoeveelheid zuur dat moet worden toegevoegd

De studies naar aanzuren verschillen in de hoeveelheid zuur dat moet worden toegevoegd om de pH van de mest te verlagen tot een bepaalde lage waarde (tabel 2, afhankelijk van het type zuur). Ook binnen het Infarm systeem varieert de hoeveelheid zuur dat moet worden toegevoegd om de pH van de mest te reduceren tot pH 5,5 op basis van de beschikbare studies. De hoeveelheid zuur die nodig is wordt bepaald door het bufferende vermogen van de mest en de pH waarnaar gestreefd wordt.

Mest is een complex mengsel van allerlei stoffen. Het toevoegen van zuur zal niet alleen een effect hebben op de reactie tussen NH_4^+ en NH_3 (vergelijking 1) maar ook op verschillende andere reacties waarbij protonen worden weggevangen. De componenten in de mest die protonen wegvangen zorgen ervoor dat de pH wordt gebufferd. Hierbij is het bufferende vermogen gedefinieerd als de hoeveelheid sterk zuur dat nodig is om de pH van de mest met 1 eenheid te verlagen.

Verschillende studies vinden een relatie tussen de hoeveelheid zuur dat moet worden toegevoegd om een bepaalde lage pH (5,5-6) te bereiken en het N-gehalte van mest (Sørensen et al., 2009 en Stevens et al., 1989). Sørensen et al. (2009) verklaren deze relatie door te stellen dat alle belangrijke proton buffer reacties zijn gerelateerd aan het N-gehalte van de mest. Het bufferen van de pH wordt geregeld door zuur-base koppels. Een studie met dunne rundmest laat zien dat de zuur-base koppels $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$, HCO_3^-

CO_3^{2-} en $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ in combinatie met CaCO_3 voor de pH buffering van mest zorgen (Husted et al 1991). Hierbij werd $\frac{1}{3}$ van de buffering door de vaste fase (CaCO_3) veroorzaakt en $\frac{2}{3}$ door de vloeistoffase. Sørensen et al. (2009) baseren de relatie tussen zuur- base reacties en N-gehalte van de mest op de processen waarbij carbonaat vrijkomt door de hydrolyse van ureum tot ammonium bicarbonaat en dat het aannemelijk is dat azijnzuur vrijkomt bij eiwit afbraak.

Sørensen et al. (2009) vinden een vaste N/S ratio van 1,3 in alle aangezuurde mestmonsters tot pH 5,5. Gebaseerd op deze ratio zou standaard Nederlandse rundermest (totale N-gehalte $4,1 \text{ g kg}^{-1}$) een zuurverbruik van $9,7 \text{ kg H}_2\text{SO}_4 \text{ ton}^{-1}$ mest hebben. Bussink (2009) berekende op basis van proeven met HNO_3 (Bussink et al., 1994) dat een zuurverbruik van $11 \text{ kg H}_2\text{SO}_4 \text{ ton}^{-1}$ nodig is om rundermest met een gemiddelde N-gehalte van $4,4 \text{ g kg}^{-1}$ aan te zuren. Dit komt dus ongeveer overeen met de waarde op basis van de simpele N/S ratio van 1,3. Op basis van het N-gehalte van mest lijkt dus dat eenvoudig een schatting kan worden gemaakt van de hoeveelheid toe te voegen H_2SO_4 om een pH van 5,5 te realiseren.

Tabel 3 geeft een overzicht van het N-gehalte van mest zoals vermeld in verschillende bronnen en de daaruit volgende hoeveelheid H_2SO_4 dat aan de mest moet worden toegevoegd om deze aan te zuren tot pH 5,5 (berekend volgens Sørensen et al., 2009). Het N-gehalte van dunne rundermest is afhankelijk van het eiwitgehalte in het rantsoen van het dier en in welke mate mest verdund wordt door spoelwater (bij het reinigen van melkstal). In een studie naar de effecten van rantsoen op NH_3 -emissie laat Duinkerken et al. (2003) zien dat rantsoen een groot effect kan hebben op de urine- en mestsamenstelling en uiteindelijk ook op de NH_3 -emissie uit de stal. Gebaseerd op de totale N-gehalte in deze rundermest kan worden berekend dat de range in het zuurverbruik om de pH te verlagen tot 5,5 ligt tussen $9,7$ en $11,9 \text{ kg H}_2\text{SO}_4 \text{ ton}^{-1}$ mest. In tegenstelling tot de studie door Duinkerken et al. (2003) lijkt in een studie van 'Koeien & Kansen' de rantsoensamenstelling (gras/maïs ratio van 80/20, 60/40 en 40/60) weinig effect te hebben het de totale N-gehalte van rundermest. Hierbij moet vermeld worden dat de krachtvoer component in deze studie niet bekend was en het dus goed mogelijk is dat de betreffende bedrijven de samenstelling van het ruwvoer hebben gecompenseerd met de samenstelling van het krachtvoer om zo een optimale eiwitvoorziening te verkrijgen. Bij het in de studie van 'Koeien & Kansen' gevonden N-gehalte ($3,9 - 4,0 \text{ g kg}^{-1}$) past een zuurverbruik van ongeveer $9 \text{ kg H}_2\text{SO}_4 \text{ ton}^{-1}$ mest. Deze range in totale N-gehalte komt redelijk overeen met het huidige landelijk gemiddelde ($4,1 \text{ g kg}^{-1}$, BLGG AgroXpertus database 2010) en het gemiddelde uit een internationale literatuur review ($3,95 \text{ g kg}^{-1}$, Sommer et al., 2001) voor rundermest. In Nederland varieert op dit moment het totale N-gehalte van dunne rundermest tussen $3,2$ (10 percentiel) en $5,0$ (90 percentiel) g kg^{-1} . Dit komt overeen met een zuurverbruik variërend tussen $7,5$ tot $12 \text{ kg H}_2\text{SO}_4 \text{ ton}^{-1}$ mest. Over het algemeen is het zuurverbruik bij de Deense studies wat lager en varieert deze tussen 5 en $10 \text{ kg H}_2\text{SO}_4 \text{ ton}^{-1}$. Een lager N-gehalte van de mest zou dit kunnen verklaren. In Sørensen et al., 2003 is het N-gehalte van onbehandelde melkvee mest $2,65 \text{ g N kg}^{-1}$. In dezelfde studie wordt voor varkensmest een N-gehalte van $4,4 \text{ g kg}^{-1}$ gevonden. Ook in Nederland is het gemiddelde N-gehalte van drijfmest voor varkens hoger dan voor koeien (BLGG AgroXpertus database, Tabel 3). Dit zou betekenen dat het zuurverbruik hoger is om varkensmest aan te zuren dan om koeienmest aan te zuren.

Het gebruik van het zuur vormt samen met de aanschaf- en onderhoudskosten van het systeem de grootste kostenpost (zie paragraaf 3.7). Het is om zowel economische als milieutechnische redenen relevant om het zuurverbruik te minimaliseren. Het aanpassen van het rantsoen is een goede mogelijkheid om het N-gehalte en daarmee het zuurverbruik te verlagen.

Tabel 3. N-gehalte en droge stof (DS) gehalte van mest zoals vermeld in verschillende bronnen en de daaruit volgende hoeveelheid zwavelzuur dat aan de mest moet worden toegevoegd om deze aan te zuren tot pH 5,5, gebaseerd op Sørensen & Eriksen, 2009.

Referentie			Mest		Zuur toevoeging
			Totaal-N (g kg^{-1})	DS gehalte	H_2SO_4 (kg ton^{-1})
Duinkerken et al., (2003)	koe	Range	4,1 – 5,0	108-123 %	9,7 – 12
Koeien & Kansen ('06-'09)	koe	Range	3,9 – 4,0	84 %	9,2 – 9,4
Blgg database 2010	koe	Range	3,2 – 5,0	62-108 %	7,5 - 12
		Land. gem.	4,1	90 %	9,7
Fokzeugen, incl. biggen, op-fokzeugen/-beren, dekberen	varken	Range	2,8 – 8,8	17–233 %	6,6 – 21
		Land. gem.	5,7	97 %	13
Vleesvarkens	varken	Range	4,7 – 9,4	105–39 %	11 – 22
		Land. gem.	7,2	105%	17
Sommer et al. (2001)	koe	Gem. int. lit.	3,95	74 g kg^{-1}	9,3
Sørensen & Eriksen (2009)	koe	Gem.	2,65	47 g kg^{-1}	6,2
	varken	Gem.	4,37	24 g kg^{-1}	10

3.4 Effect van aanzuren op NH_3 -emissies en N-gehalte mest in de melkveehouderij

Het effect van aanzuren van mest met het Deense Infarm systeem op de emissie van NH_3 zal hier in enig detail worden uitgewerkt voor de Nederlandse situatie. Als eerste wordt het systeem uitgewerkt voor de melkveehouderij omdat het aandeel op de totale NH_3 -emissie uit mest voor het grootste gedeelte afkomstig is uit rundmest. Van de totale Nederlandse mestuitscheiding is ongeveer 75% afkomstig van rundvee en 20% van varkens (Velthof et al., 2000). Van de rundveemest wordt ongeveer 65% uitgescheiden in de stal en 35% bij beweiding. Rundveemest wordt hoofdzakelijk toegediend op grasland.

Melkveebedrijven kennen verschillen in management en rantsoenen (N-gehalte in het voer) waardoor ook de mestsamenstelling en NH_3 -emissie varieert. Om een representatief beeld te krijgen van het effect van aanzuren van mest met het Infarm systeem op de NH_3 -emissie zijn 6 representatieve scenario's uitgewerkt (Tabel 4). Voor beperkt weiden (Bw) en permanent opstallen (Po) zijn drie rantsoenen uitgewerkt met een N-gehalte van de mest die varieert tussen hoog N (HN), gemiddeld N (GN) en laag N (LN).

Tabel 4. Overzicht van de beweidingssystemen en het N-gehalte in het rantsoen en de gebruikte afkorting per scenario.

	melk ureumgehalte		
	29 $\text{mg } 100\text{g}^{-1}$	24 $\text{mg } 100\text{g}^{-1}$	20 $\text{mg } 100\text{g}^{-1}$
Beperkt weiden	Bw – HN	Bw – GN	Bw – LN
Permanent opstallen	Po – HN	Po – GN	Po – LN

Bij beperkt weiden komen de koeien in de zomer (175 dagen per jaar) beperkt in de wei (9 uur per dag). Bij permanent opstallen staan de koeien het hele jaar binnen. Hoog N (HN): een standaard rantsoen gebaseerd op gras en een jaargemiddeld ureumgehalte van 29 $\text{mg } 100\text{g}^{-1}$. Gemiddeld N (GN): een standaard rantsoen gebaseerd op gras en een jaargemiddeld ureumgehalte van 24 $\text{mg } 100\text{g}^{-1}$. Dit is ongeveer het gemiddelde gehalte in Nederland. Laag N (LN): een maïsrijk rantsoen (50%) en een jaargemiddeld ureumgehalte van 20 $\text{mg } 100\text{g}^{-1}$. Met modellen kan deze emissie berekend worden (Bussink & Oenema, 1998; Duinkerken et al., 2003 & 2004, Velthof et al. 2009, Handreiking bedrijfsspecifieke excretie melkvee 2010). De modellen van Bussink & Oenema (1998) en Sebek (2010) zijn vrij theoretisch

van aard en vragen veel input parameters en aannames. Daarom wordt de voorkeur gegeven aan de modellen van Duinkerken et al. (2003), waarbij de ammoniakemissie is gekoppeld aan het ureumgetal en de temperatuur. Het melkureumgehalte is een indicator voor de eiwitrijkdom van het rantsoen en wordt altijd gemeten.

De scenario's hebben betrekking op relatief grote bedrijven die zelfvoorzienend zijn in de ruwvoerproductie. Dit is gedaan omdat, op dit moment het aantal bedrijven (snel) afneemt en de grote van de overgebleven bedrijven (snel) toeneemt. Verwacht wordt dat in 2020 het aantal bedrijven zal halveren en het aantal koeien zal stijgen naar gemiddeld 150 (Silvis et al., 2009). Indien het aanzuur systeem geschikt wordt bevonden, is de verwachting dat dit systeem in de toekomst ook alleen maar zal worden geïmplementeerd op grotere melkveebedrijven in verband met de kosten van de aanschaf van de apparatuur. Op dit moment is de gemiddelde melkproductie iets meer dan $8000 \text{ l koe}^{-1} \text{ jr}^{-1}$. Uitgangspunt in de berekeningen is $9000 \text{ l koe}^{-1} \text{ jr}^{-1}$.

3.4.1 Stalemissie NH_3

Voor de zes scenario's (Tabel 4) is de stalemissie van NH_3 berekend op basis van het model van Duinkerken et al. (2003). De input parameters voor dit empirische model zijn temperatuur en ureumgehalte van de melk. Op basis van vergelijking 4 voor permanent opstallen zie Duinkerken et al. (2003) en vergelijking 5 voor beperkt weiden zie Duinkerken et al. (2004) kan de stalemissie worden berekend:

$$\text{OO: } E = (1/190) \cdot \exp(0.751 + 0.0276 \cdot (\text{Temp} - 15) + 0.053466 \cdot U - 0.00041145 \cdot U^2) \quad \text{Vergelijking 2}$$

$$\text{BW: } E = (1/175) \cdot \exp(1.25 + 0.026 \cdot (\text{Temp} - 15) - 0.0087 \cdot U + 0.00058667 \cdot U^2) \quad \text{Vergelijking 3}$$

Hierin is:

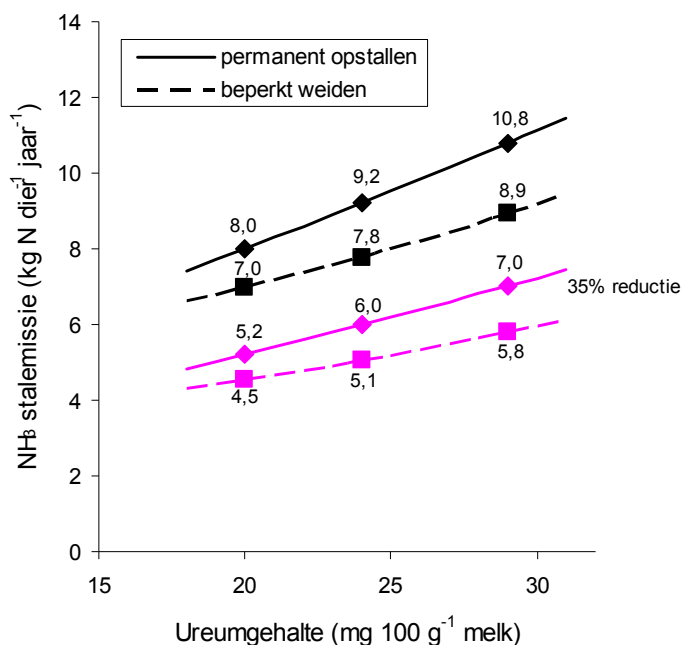
- de stalemissie uitgedrukt in $\text{kg NH}_3 \text{ dier}^{-1} \text{ dag}^{-1}$;
- temp de temperatuur ($^{\circ}\text{C}$); en
- U het jaargemiddelde ureumgehalte van de tankmelk ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$).

Het model voor beperkt weiden is gebaseerd op data met rantsoenaanpassingen bij koeien met summerfeeding (kuil + krachtvoer) die jaarrond op stal stonden in een natuurlijk geventileerde ligboxenstal met roostervloer zonder mestschuif (Duinkerken et al., 2003). Het model voor beperkt weiden is aangepast ten opzichte van het permanent opstallen model in die zin dat de koeien in de zomer (175 dagen per jaar) 9 uur per dag naar buiten gaan en een deel van het rantsoen bestaat uit vers gras (Duinkerken et al., 2004).

Figuur 2 laat de resultaten zien van de stalemissie gebaseerd op Duinkerken et al. (2003 & 2004). Vergeleken met de stalemissie zoals berekend op basis van het model van Bussink & Oenema (1998) komen de resultaten voor permanent opstallen precies overeen met het Duinkerken model maar bij beperkt weiden berekent het model van Bussink een iets hogere $\text{NH}_3\text{-N}$ stalemissie. In vergelijking met de $\text{NH}_3\text{-N}$ emissie uit de Regeling ammoniak en veehouderij (Rav) komen de berekende waarden bij een gemiddeld ureumgehalte van 24 goed overeen met de waarden voor overige stallen voor rundvee ouder dan 2 jaar ($9,1 \text{ kg N dier}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ bij permanent opstallen en $7,8 \text{ kg N dier}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ bij beperkt weiden, Rav). Deze vergelijkingen laten zien dat de afgeleide formules van Duinkerken et al. (2003 & 2004) voldoen om een indicatie te geven van de stalemissie van NH_3 .

Figuur 2 laat zien dat met aanzuren van de mest de NH_3 -emissie uit de stal aanzienlijk wordt gereduceerd. Hierbij is de aanname gedaan dat aanzuren de emissie met 35% reduceert en dat het ureumgehalte geen effect heeft op dit percentage. De emissiereductie van 35% is erop gebaseerd dat ongeveer $\frac{1}{3}$ van de

emissie vrijkomt uit de mestput. De andere $\frac{2}{3}$ komt vrij van de stalvloer. De mest uit de put wordt met het Infarm systeem aangezuurd. Een gedeelte van de aangezuurde mest wordt weer teruggepompt naar de stalvloer waardoor de pH van de mest op de vloer ook wordt verlaagd. Een reductie in NH_3 -emissie van 35% is dus een veilige aanname. Kai et al. (2008) vond een reductie van 70%. In onbehandelde mest is de NH_3 -emissie gerelateerd aan het N-gehalte. Het is goed mogelijk dat dit in aangezuurde mest ook het geval is.



Figuur 2: De NH_3 -emissie uit de stal per dierplaats per jaar berekend op basis van ureumgehalte en temperatuur volgens Duinkerken et al. (2003 & 2004) voor onbehandelde mest (zwarte lijnen en symbolen). De stalemissie van aangezuurde mest is weergegeven met roze lijnen en symbolen. In de figuur zijn de NH_3 -emissies bij een ureumgehalte van 20, 24, en 29 apart weergegeven.

Bij een ureumgehalte van 24 mg 100 g⁻¹ (GN) en de aanname van een NH_3 -emissie reductie van 35% uit de stal met het Infarm systeem wordt de NH_3 -emissie uit de stal gereduceerd naar 5,1 en 6 kg N dier⁻¹ jr⁻¹ bij respectievelijk beperkt weiden en permanent opstallen (zie Figuur 2). Wanneer mest wordt aangezuurd met het Infarm systeem is de verlaging van de NH_3 -emissie uit de stal groter of vergelijkbaar met het fysiek aanpassen van de stal, op één stalaanpassing na (Rav). Hierbij zijn de positieve effecten van aanzuren op de reductie in NH_3 -emissie bij toedienen van de mest (ketenaanpak) nog niet meegenomen.

3.4.2 Emissie NH_3 bij toedienen mest

De emissie van NH_3 bij het toedienen van mest is van verschillende factoren afhankelijk. De belangrijkste is de manier waarop de mest wordt uitgereden. In Nederland is het verplicht om mest toe te dienen met één van de "laag emissie" methoden. In Tabel 5 is per methode het verlies van N weergegeven. Door gebruik te maken van de de sleepvoetenmachine of zadenbemesting wordt een aanzienlijke emissiereductie gehaald ten opzichte van breedwerpig toedienen van de mest.

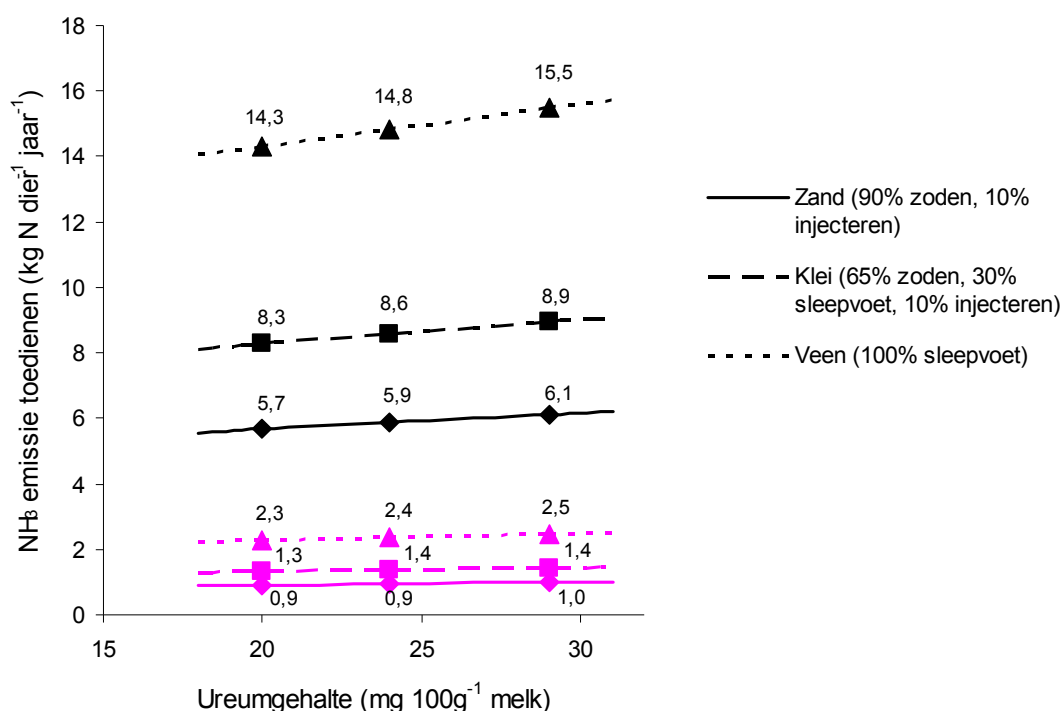
Grondsoort is om meerdere redenen ook een belangrijke factor in de NH_3 -emissie. Met name de parameters kationenomwisselcapaciteit (CEC), pH en pH bufferend vermogen van de grond zijn direct van belang op de emissie (Sommer et al., 2004, Aarts et al., 2007). Bij een hogere CEC en een lagere pH is de NH_3 -emissie lager. Ook als de grond de normaal gesproken hoge pH van mest goed kan bufferen (dus weerstand biedt tegen het verhogen van de pH van de bodem) leidt dit tot lagere NH_3 -emissies. Grondsoort

heeft ook een indirect effect op de emissie via het voerspoor (Aarts et al. 2007). Op klei- en veengronden zal het ruwvoer met name gebaseerd zijn op (eiwitrijk) gras. Dit leidt tot een hogere NH_3 -emissie per ton melk op klei- en veengronden ten opzichte van zandgronden. Op zandgronden kan (gemakkelijker) ook het (eiwitarme) maïs worden geteeld. Een ander belangrijk verschil per grondsoort is de manier waarop de mest wordt uitgereden (Tabel 5).

Tabel 5. De gangbare methode van toedienen per grondsoort en het verlies van N per methode van toedienen (gebaseerd op Aarts et al. 2007).

Methode van toedienen	Zand	Klei	Veen	Verlies van N (% N)
Injecteren (bouwland)	0,1	0,05		10,4
Zodenbemesting	0,9	0,65		11,5
Sleepvoet		0,3	1	28,8
Breedwerpig				74

In Figuur 3 is per grondsoort de NH_3 -emissie bij toedienen uitgezet tegen het ureumgehalte van de melk. De berekening is gebaseerd op de excretieforfaits bij hoogproductieve koeien (9000 l koe^{-1}) en het N-verlies per methode van toedienen gedifferentieerd naar het gebruik van deze methode op zand-, klei- en veengronden (Tabel 5).



Figuur 3: De NH_3 -emissie bij toedienen mest ($\text{kg N dier}^{-1}\text{jaar}^{-1}$) berekend voor zand-, klei- en veengronden op basis van de methode van toedienen, voor onbehandelde mest (zwarte lijnen en symbolen), aangezuurde mest ($\text{pH}=5,5$) waarbij de emissie reductie uit de stal 35% was (roze lijnen en symbolen). Voor de berekening is de TAN-gehalte van de mest gecorrigeerd voor de lagere NH_3 -emissie uit de stal bij permanent opstallen. In de figuur zijn de NH_3 -emissies bij een ureumgehalte van 20, 24, en 29 apart weergegeven. Zie tekst voor de kanttekeningen bij de relatief hoge NH_3 -emissie op veengronden.

Figuur 3 laat zien dat het aanzuren van mest, naast het verlagen van de stalemissie, er ook toe kan leiden

dat de emissie bij toedienen nog eens sterk wordt gereduceerd. Het rantsoen lijkt een relatief klein effect te hebben op de NH_3 -emissie bij toedienen van de mest.

In Tabel 6 is het effect van aanzuren van mest op de NH_3 -emissie en het totale ammoniakale N-(TAN) gehalte van de mest weergegeven. Het verschil in NH_3 -emissie tussen onbehandelde en aangezuurde mest leidt tot een verschil in het uiteindelijke TAN-gehalte van de mest. Bij onbehandelde mest leidt stalemissie ertoe dat ongeveer 14% van de TAN uit de mest vervluchtigd. Na toedienen vervluchtigd nog eens 15% van de resterende TAN-N uit de mest. Na aanzuren is door stalemissie gemiddeld 9% van de TAN vervluchtigd en na toedienen slechts 4% van de resterende TAN in de mest. Afhankelijk van de grondsoort is het TAN-gehalte van de mest na toedienen 17 tot 43% hoger dan in onbehandelde mest.

De daling met 53 tot 68% van de NH_3 -emissie uit de gehele mestketen (vanaf stal tot en met toedienen) leidt tot een hoger N-gehalte van de mest bij toedienen. Het effectieve N-gehalte (TAN) in mest neemt toe met gemiddeld 8, 10 of 16 kg N $\text{koe}^{-1} \text{jr}^{-1}$ op respectievelijk zand-, klei-, of veengrond (Tabel 6). Dit komt overeen met ongeveer 13-28 kg N ha^{-1} afhankelijk van de grondsoort (1,8 koe ha^{-1} Po en 1,65 koe ha^{-1} Bw). Ook Bussink (2009) berekende dat het effectieve N-gehalte in mest zou toenemen met 17-32 kg N ha^{-1} afhankelijk of de koeien het hele jaar binnen staan of beperkt weiden en hoe de mest wordt aangewend. Door het hogere N-gehalte van de mest kan de kunstmest gift worden verlaagd of zelfs achterwege blijven. Behalve dat dit kosten bespaard leidt dit ook tot een reductie in N_2O -emissies (zie paragraaf 3.6.3).

Tabel 6. NH_3 -emissie en TAN-gehalte mest na emissie uit de stal en na toedienen mest op zand, klei en veengronden voor permanent opstallen (Po) en beperkt weiden (Bw).

<i>Melkureumgehalte</i>		<u>Onbehandelde mest</u>			<u>Aangezuurde mest</u>			<u>Gem. verschil</u>
		20	24	29	20	24	29	
NH_3 -emissie (kg N $\text{koe}^{-1} \text{jr}^{-1}$)								
stal	Po	8,0	9,2	11	5,2	6,0	7,0	
	Bw	7,0	7,8	8,9	4,5	5,1	5,8	
toedienen	Zand	5,7	5,9	6,1	0,9	0,9	1,0	
	Klei	8,3	8,6	8,9	1,3	1,4	1,4	
	Veen	14	15	15	2,3	2,4	2,5	
TAN- hoeveelheid mest (kg N $\text{koe}^{-1} \text{jr}^{-1}$)								
initieel		58	61	65	58	61	65	
na stal	Po	50	52	54	53	55	57	5,8%
	Bw	51	53	56	53	56	59	5,0%
na toedienen	Po: Zand	44	46	48	52	54	56	17%
	Po: Klei	41	43	45	51	53	56	23%
	Po: Veen	35	37	38	50	52	55	43%
<i>Gem. verlies TAN na stal t.o.v. initieel (%)</i>		13	14	15	9	9	11	
<i>Gem. verlies TAN na toedienen t.o.v. na stal (%)</i>		16	15	15	3	4	3	

3.4.3 Effect rantsoensamenstelling op NH_3 -emissie

Met scherper voeren op eiwit kan een behoorlijke reductie in NH_3 -emissie worden bereikt. In Figuur 2 is te zien dat een reductie van bijna 3 kg N $\text{dier}^{-1} \text{jr}^{-1}$ kan worden bereikt in onbehandelde mest als het ureumgehalte veranderd van 29 naar 20. Bij eenzelfde verlaging in ureumgehalte kan de stalemissie na aanzuren van de mest met 1,8 kg N $\text{dier}^{-1} \text{jr}^{-1}$ worden gereduceerd. Bij beperkt weiden lijkt rantsoensamenstelling een wat kleiner effect te hebben op de te behalen emissiereductie. Dit is logisch omdat een gedeelte van de NH_3 -emissie uit mest in de wei plaatsvindt. Behalve een lagere NH_3 -emissie is

een bijkomend voordeel van een lager melkureumgehalte, ofwel een N-armere rantsoen, dat minder zuur nodig is om de mest aan te zuren tot pH 5,5 (Tabel 4) door een lager N-gehalte in de mest.

Een verlaging van N-gehalte in het rantsoen, en daarmee de NH_3 -emissie uit de stal, kan door aangepast management op verschillende manieren worden bereikt (Duinkerken, 2003). Ten eerste door een verlaging van het onbestendig eiwitgehalte (OEB) in het rantsoen met als richtlijn een OEB van $0 \text{ g dier}^{-1} \text{ dg}^{-1}$. Een deel van de OEB verlaging kan worden gerealiseerd via het ruwvoer en een ander deel via een vermindering van het gebruik van eiwitrijk krachtvoer. Een verlaging van het OEB in ruwvoer kan worden bereikt door het gebruik van eiwitarme ruwvoerders zoals snijmaïs, verlaging van de N-bemesting op grasland en gras later oogsten. Verder is het mogelijk om te sturen op normvoeding voor darmverteerbaar eiwit (DVE) omdat een overmaat aan DVE in het rantsoen niet wordt benut door het vee en bijdraagt aan N-excretie via urine en een verhoogd ureumgehalte. Voor het realiseren van een laag en stabiel ureumgehalte is controle op de voeding noodzakelijk. Beperkt weiden of summerfeeding draagt hieraan bij. Bij onbeperkt weiden is dit moeilijk te realiseren omdat grasaanbod, grassamenstelling en grasopname zelden goed uitgebalanceerd zijn op eiwitbehoefte.

3.5 Effect van aanzuren op NH_3 -emissies en N-gehalte mest in de varkenshouderij

Varkensmest wordt allemaal in de stal uitgescheiden en vervolgens wordt het grotendeels toegediend op maïs en in mindere mate op akker- en grasland (Velthof et al., 2000).

Tabel 7. NH_3 -emissie en TAN-gehalte van varkensmest na emissie uit de stal en na toedienen.

	<u>NH_3-emissie</u>		<u>TAN hoeveelheid mest</u>		<u>Gem. verschil</u>
	kg N dier ⁻¹ jr ⁻¹		kg N dier ⁻¹ jr ⁻¹		%
	Onbehandeld	Aangezuurd	Onbehandeld	Aangezuurd	
N uitscheiding via mest			8,8	8,8	
NH_3 -emissie					
Uit een standaard stal (Rav)	2,9	1,9	5,9	6,9	17
Bij toedienen*	1,3	0,20	4,6	6,7	46
Gem. verlies TAN na stal t.o.v. initieel (%)			33	21	
Gem. verlies TAN na toedienen t.o.v. na stal (%)			22	3	

* Aanname verlies TAN van 22% bij inwerken mest

Voor varkens is de standaard stalemissie gemiddeld $2,9 \text{ kg N dier}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ (Rav). Door aanzuren kan de stalemissie worden verlaagd naar gemiddeld $1,9 \text{ kg N dier}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ (35% reductie, Tabel 7). Deze emissie na aanzuren is hoger dan uit emissiearme stallen waar de vloer of mestkelder is aangepast (gemiddeld $1,1 \pm 0,4 \text{ kg N dier}^{-1} \text{ jr}^{-1}$, Rav). In vergelijking met emissiearme stallen waar luchtwassers worden toegepast (gemiddeld $0,5 \pm 0,2 \text{ kg N dier}^{-1} \text{ jr}^{-1}$, Rav) is aanzuren wat betreft NH_3 -emissie uit de stal veel minder effectief.

In tegenstelling tot emissiearme stallen wordt echter door aanzuren ook de NH_3 -emissie verlaagd bij toedienen (Tabel 7). In totaal kan de NH_3 -emissie gemiddeld worden verlaagd met $2,1 \text{ kg N dier}^{-1} \text{ jr}^{-1}$. Dit is een NH_3 -emissiereductie van ongeveer 50%. Hiermee wordt aanzuren qua prestatie wel concurrerend met emissiearme stallen.

3.6 *Effect van aanzuren op broeikasgas emissies*

3.6.1 CH₄-emissie

Meerdere studies hebben aangetoond dat de CH₄-emissie sterk afneemt of zelfs helemaal wordt stilgezet bij aanzuren van de mest (Oenema & Velthof, 1993, Ottosen et al., 2009, Berg et al., 2006). In de studie van Oenema & Velthof (1993) wordt rundermest aangezuurd tot een pH tussen 6,0 en 3,0 met HNO₃. Zij vinden al bij een pH van 6 dat de methanogenese bijna volledig wordt stilgelegd. Bij incubatie experimenten in het laboratorium vinden Berg et al. (2006) dat aanzuren met melkzuur (pH 4,2-5,7) de CH₄-emissie reduceert met meer dan 90% en aanzuren met HNO₃ (pH 3,9-5,2) de CH₄-emissie reduceert met 17-75%. Een oorzaak voor het verschil in CH₄-emissie reductie tussen het gebruik van melkzuur en HNO₃ wordt niet gegeven, maar kan veroorzaakt worden door een verschil in redoxpotentiaal die bij HNO₃ naar verwachting minder laag is dan bij melkzuur. In de studie van Ottosen et al. (2009) wordt varkensmest aangezuurd met H₂SO₄ tot pH 5,5. Dit resulteerde in een CH₄-emissie reductie van 50% uit de mestkelder en van 98-99% uit de opslag. De hypothese waarom de methanogenese in de mestkelder niet geheel wordt stilgelegd is de constante aanvoer van verse mest met nog wat actieve methanogenese bacteriën.

De emissie van CH₄ uit mest bedraagt ruwweg 2,7 Mton (1,5 uit rundermest en 1,1 uit varkensmest). Indien het aanzuren van de mest grootschalig wordt toegepast (90% van alle runder- en varkensmest) wordt aangezuurd en aanzuren leidt tot een emissiereductie van 90% kan dit in potentie leiden tot het behalen van 8% van de klimaatambitie voor de overige niet-CO₂ broeikasgassen (2 / 26 Mton CO₂ equivalenten). Omdat het implementeren en onderhouden van het systeem waaronder de aankoop van zuur kosten met zich meebrengt, is het realistischer om ervan uit te gaan dat het systeem niet op 90% van de bedrijven zal worden geïmplementeerd. Het is met name interessant voor melkveebedrijven in de buurt van Natura 2000 gebieden die willen uitbreiden. Ongeveer de helft van de melkveebedrijven ligt in de buurt van Natura 2000 gebieden. Stel dat de helft zou willen uitbreiden, stel verder dat ook een kwart van de varkensbedrijven het systeem wil gebruiken dan zou toch nog 0,6 Mton CO₂ equivalenten kunnen worden bespaard. Dit is ruim 2% van de klimaatambitie voor overige niet-CO₂ broeikasgassen.

Lesschen et al. (2008) verwachten dat het aanzuren van mest een reductiepotentieel heeft van 1 Mton CO₂ equivalenten. Ondanks dat zij verwachten dat de zekerheid om dit potentieel te bereiken "gemiddeld" is, concluderen zij toch dat deze reductie niet leidt tot klimaateffecten en dat er slechts 'meestal positieve' milieueffecten optreden. Deze conclusie lijkt tegenstrijdig met het verwachte reductiepotentieel. De conclusie is zeer waarschijnlijk gebaseerd op een systeem waarbij HNO₃ wordt gebruikt in plaats van H₂SO₄. Bij het gebruik van HNO₃ vindt er extra denitrificatie plaats waarbij de extra N₂O-emissie de reductie in CH₄-emissie (gedeeltelijk) compenseert.

Indien wordt aangenomen dat op 25% van de melkveebedrijven de CH₄-emissie met 90% wordt gereduceerd door aanzuren van mest dan leidt dit tot een reductie van 0,34 Mton CO₂ equivalenten. Ten opzichte van de totale CH₄-emissie per koe (7,3 Mton CO₂ eq.) is dit een emissiereductie van 4,6% per koe. Hiermee zou de doelstelling uit het convenant 'Schone en zuinige agrosectoren' van 5% CH₄-emissie reductie per melkkoe voor 2020 zo goed als zijn behaald. Ten opzichte van de CH₄-emissie uit mestopslag is de doelstelling uit het convenant 'Schone en zuinige agrosectoren' van 15%, bij een berekende emissiereductie van 23% door middel van aanzuren ook te realiseren.

Effect rantsoensamenstelling op CH₄-emissie

De productie van CH₄ uit de pens wordt beïnvloed door de samenstelling van het voer en condities in de pens. De grootste reductie in CH₄-emissie is te bereiken door een hogere melkproductie per koe en een

vermindering van het aantal stuks jongvee ten opzichte van melkvee (Bannink et al., 2009).

Door optimalisatie van het rantsoen (ruwvoer en krachtvoer) kan de CH₄-emissie per kg geproduceerde melk 10-15% dalen (Bannink et al., 2009). De lagere CH₄-emissie komt tot stand door een verbeterde rantsoenenbenutting waardoor zowel voeropname als melkproductie wordt verhoogd (Bannink et al., 2009). Er zijn globaal 5 mogelijkheden om via het voerspoor de CH₄-emissie te verlagen (Van Laar en Van Straalen, 2004, Tamminga et al., 2007):

1. Ruwvoer: grassilage vervangen door snijmaissilage (5% reductie mogelijk);
2. Ruwvoer: verhogen kwaliteit (VEM) (5% reductie mogelijk);
3. Krachtvoer: verhogen vetpercentage (4% reductie mogelijk volgens Van Laar & Van Straalen (2004); variabele resultaten volgens Tamminga et al. (2007);
4. Krachtvoer: verhogen zetmeelpercentage (2-8% reductie mogelijk); en
5. Krachtvoer: verhogen krachtvoeraandeel in rantsoen (2% reductie mogelijk).

De reductie in CH₄-emissie door het gebruik van meer krachtvoer met een hoger zetmeelpercentage kan (gedeeltelijk) worden gecompenseerd door de CO₂ uitstoot bij productie en transport van het krachtvoer (Tamminga et al., 2007).

Het verhogen van het snijmaisaandeel in ruwvoer betekent minder N in het rantsoen en dus ook in de mest. De overige maatregelen lijken eveneens te leiden tot minder N in het rantsoen en daarmee ook in de mest. Dit zou betekenen dat de voorgestelde maatregelen dus gunstig werken voor zowel met betrekking tot de vermindering van de CH₄- als NH₃-emissie. Bovendien is minder zuur nodig om een bepaalde pH te bereiken. Het effect van de voorgestelde voermaatregelen op broeikasgasemissies en NH₃-emissies kan via een aanvullende studie nader worden gekwantificeerd.

3.6.2 CO₂-emissie

Voor de lokale C cyclus geldt dat CO₂ wordt vastgelegd door het gewas, het gewas wordt gegeten door de koe, het grootste gedeelte wordt via de mest weer uitgescheiden, en na toedienen op het land weer afgebroken tot CO₂. Netto komt de CO₂ die wordt vastgelegd door het gewas dus ook weer vrij tijdens de afbraak van de mest. De afbraak van mest in de bodem zorgt er ook voor dat de mineralen in mest vrijkomen voor het groeiende gewas.

Door het aanzuren van mest worden microbiële processen waarbij organische componenten worden afgebroken gereduceerd dan wel stil gelegd (Fangueira et al., 2010b, Ottosen et al., 2009, Sørensen & Eriksen, 2009). Resultaten van Ottosen et al. (2009) laten zien dat in varkensmest de anaerobe afbraak processen in de stal en opslag sterk (>98%) afnemen door aanzuren (H₂SO₄ pH 5,5). Fangueira et al. (2010b) laten in een incubatie experiment ook zien dat aan het eind van de incubatie experiment de totale C-emissie hoger is uit de onbehandelde vloeibare fractie van de mest (15% van de totale C) in vergelijking tot de aangezuurde vloeibare fractie (9% van de totale C). Dit is ondanks dat er de eerste 45 minuten na aanzuren van de vloeibare fractie een hoge CO₂-emissie plaatsvindt (400 mg C l⁻¹) in vergelijking met de onbehandelde vloeistof fractie (20 mg C l⁻¹). Soms is dit ook zichtbaar in de vorm van schuimvorming bij aanzuren.

De oorzaak dat de microbiële activiteit wordt stilgelegd is de aanwezigheid van hoge concentraties vluchtige vetzuren in geprotoneerde vorm (20-25 mM in aangezuurde mest ten opzichte van <0.1 mM in onbehandelde mest, Ottosen et al., 2009). De positieve gevolgen hiervan zijn de eerder vermelde sterke reductie in CH₄-emissie. Ottosen et al. (2009) vinden echter ook dat de sulfaatreductie wordt stilgelegd waardoor het giftige H₂S niet wordt gevormd. De lagere microbiële activiteit zal er toe leiden dat gedurende de mest opslag minder C uit de mest wordt gemineraliseerd en het C-gehalte van de mest dus toeneemt (Sørensen & Eriksen, 2009).

Het is mogelijk dat een inhibitie van de microbiële afbraak van mest in stal en opslag doorwerkt na toedienen van de mest aan de bodem. Dit is onwenselijk omdat indien de afbraaksnelheid afneemt ook het beschikbaar komen van voedingsstoffen uit de mest afneemt. Ook kan de toename in de concentraties makkelijk afbreekbare vluchtige vetzuren in aangezuurde mest ten opzichte van onbehandelde mest (Ottosen et al., 2009, Sørensen & Eriksen, 2009) leiden tot een tijdelijke immobilisatie van N na toedienen aan de bodem (Kirchmann & Lundvall, 1993). Zover bekend is het effect van het toedienen van aangezuurde mest aan de bodem op CO₂-emissie en N-beschikbaarheid in twee studies onderzocht; Sørensen & Eriksen (2009) en Fangueiro et al. (2010a).

Sørensen & Eriksen (2009) vinden geen effect van aanzuren op het vrijkomen van N in de bodem ten opzichte van onbehandelde mest. Fangueiro et al. (2010a) vinden in een incubatie experiment met een zandgrond dat het toedienen van aangezuurde mest (H₂SO₄ tot pH 5,5) na 30 dagen resulteert in een 55% lagere CO₂-emissie uit de bodem ten opzichte onbehandelde mest ondanks dat de totale toegevoegde hoeveelheid C gelijk is. Na 1 dag is het grootste verschil tussen de emissie van aangezuurde en onbehandelde mest uit de bodem zichtbaar in de vloeibare fractie van de mest (20 versus 180 mg C kg⁻¹ droge grond). Het grote verschil na 1 dag wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het verschil in de hoeveelheid opgelost HCO₃⁻ en CO₃²⁻ in de vloeistoffractie van de mest omdat bij het aanzuren de opgeloste HCO₃⁻ en CO₃²⁻ grotendeels vervluchtigt als CO₂.

De resultaten van deze twee studies lijken elkaar mogelijk tegen te spreken. De lagere CO₂-emissies uit de bodem na toedienen van aangezuurde mest vergeleken met onbehandelde mest (Fangueiro et al., 2010a) kan een indicatie zijn voor een lagere afbraaksnelheid. De resultaten van Sørensen & Eriksen (2009) wijzen er echter op dat het aanzuren van mest wel effect heeft op de microbiële activiteit in de mest in de stal en opslag maar dat na toedienen dit effect niet doorwerkt op het beschikbaar komen van N voor het groeiende gewas. Uit Denemarken, waar het systeem al enkele jaren in de praktijk wordt gebruikt, zijn geen signalen bekend van een lagere beschikbaarheid van nutriënten uit aangezuurde mest gedurende het groeiseizoen.

Het inzetten van zwavelzuur is positief vanuit oogpunt van CO₂-equivalenten. Bij de productie van zwavelzuur komt namelijk veel energie vrij (EFMA, 2000; Wood & Cowie, 2004). Hoeveel hangt af van het soort zwavelproductie proces. Deze energie kan in de chemische industrie nuttig gebruikt worden in allerlei andere processen. In het kader van deze studie is daarom niet verder ingegaan op de CO₂ fingerprint van zwavelzuur.

3.6.3 N₂O-emissie

Het grootste gedeelte van de totale N₂O-emissie uit de landbouw komt vrij bij emissies uit de bodem na toedienen van mest (Tabel 1). Zover bekend, hebben slechts twee studies het effect van het toedienen van aangezuurde mest aan een bodem op N₂O-emissie onderzocht; Fangueiro et al. (2010a) en Pain et al. (1990). Fangueiro et al. (2010a) voerden incubatie experimenten uit met aangezuurde (H₂SO₄ pH 5,5) varkensmest op een zandgrond. Pain et al. (1990) voerden veldproeven uit met aangezuurde (pH 5) koemest op een goed en slecht gedraineerde grond. Fangueiro et al. (2010a) vonden dat in de aangezuurde mest de N₂O productie veel later op gang kwam (26 dagen) in vergelijking met onbehandelde mest (12 dagen). In het veld zou door het later op gang komen van de denitrificatie / nitrificatie van aangezuurde mest een reductie van N₂O-emissie kunnen worden bereikt indien in de tussentijd het groeiende gewas de N opneemt, en er dus later minder minerale N in de grond aanwezig is. Pain et al. (1990) vond geen verschil in het tijdstip waarop de N₂O-emissie op gang kwam tussen aangezuurde en onbehandelde mest.

Ondanks dat Fanguero et al. (2010a) in de aangezuurde mest de N_2O productie veel later op gang kwam, lieten de incubatie experimenten (zonder gewas) geen verschil zien in de cumulatieve N_2O productie tussen de aangezuurde en onbehandelde mest na 60 dagen. Indien de vloeibare- en vaste fase werden gescheiden voor aanzuren dan laten de incubatie experimenten zien dat het aanzuren wel kan leiden tot een aanzienlijke reductie (76%) in de directe N_2O -emissie na toedienen van mest aan de bodem. In tegenstelling tot een lagere N_2O -emissie bij aangezuurde mestfracties, leek in de studie van Pain et al. (1990) de N_2O -emissie juist hoger (41%, in een enkele meting) bij aangezuurde ten opzichte van onbehandelde mest.

De twee studies die de directe N_2O -emissie uit de bodem hebben onderzocht, laten een range zien in het effect van aanzuren op N_2O -emissie die varieert tussen een emissiereductie van 76% na mestscheiding tot geen effect zonder mestscheiding tot een emissietoename van 41% ook zonder mestscheiding. Indien wordt aangenomen dat op 25% van de melkveebedrijven en varkensbedrijven het Infarm systeem wordt geïmplementeerd dan komt dit overeen met een range variërend tussen een afname van 0,46 Mton CO_2 equivalenten en een toename van 0,25 Mton CO_2 equivalenten. Hierbij is er van uitgegaan dat de directe N_2O -emissie die vrijkomt bij het toedienen van organische mest aan de bodem overeenkomt met 2,4 Mton CO_2 equivalenten (gebaseerd op van der Hoek et al. 2006).

Een emissiereductie is ook mogelijk door het later op gang komen van de denitrificatie (Fanguero et al. 2010a). Indien wordt aangenomen dat hiermee een emissiereductie van 30% kan worden gehaald, dan kan aanzuren leiden tot een reductie van 0,18 Mton CO_2 equivalenten.

Omdat de studies van Pain et al. (1990) en Fanguero et al. (2010a) tegenstrijdige resultaten laten zien, dient het effect van aanzuren op het tijdstip waarop denitrificatie op gang komt nader onderzocht te worden. In onderstaande zullen wij hier nader op ingaan op basis van bestaande kennis.

Het aanzuren van mest heeft effect op meerdere factoren die van invloed zijn op de N_2O -emissie. Dit zijn:

- Hoger N-gehalte van de mest (directe emissie);
- Lagere kunstmestgift (directe emissie);
- Lagere N-depositie (indirecte emissie); en
- Hoger gehalte makkelijk afbreekbare C-verbindingen in mest.

Effect van aanzuren van mest op de directe N_2O -emissie

Het aanzuren van mest is in eerste instantie onderzocht en ontwikkeld om de NH_3 -emissie uit mest te reduceren. Dit heeft tot gevolg dat het N-gehalte van de mest toeneemt. Het effect hiervan kan op twee manieren doorwerken op de directe N_2O -emissie uit de bodem. Aan de ene kant is minder kunstmest nodig wat de N_2O -emissie zal verlagen. Aan de andere kant zal een hoger N-gehalte van mest de N_2O -emissie na toedienen doen toenemen. Deze toename kan het gevolg zijn van de gecombineerde effecten van i) een toename in de verhouding N_2O/N_2 van de denitrificatieproducten bij hoger NO_3^- gehalte, ii) een langere periode waarin de minerale N gehalten in de bodem zijn verhoogt, en iii) een grotere hoeveelheid minerale N die in de herfst en winter in de bodem achter blijft (Velthof et al., 2000).

Om het netto effect van een hoger N-gehalte van mest op de N_2O -emissie te kunnen berekenen zijn de emissiefactoren (EF) van kunstmest en organische mest van belang. Het IPCC houdt aan dat zowel uit kunstmest als uit mest de EF gelijk zijn (1,25% van het N komt vrij in de vorm van N_2O). Voor de Nederlandse situatie zijn echter nog een aantal onderzoeken uitgevoerd waarin onderscheidt wordt gemaakt tussen EF voor kunstmest en EF voor organische mest en tussen N_2O -emissie uit minerale- en organische gronden. Een samenvatting van de EF is weergegeven in tabel 8. Voor de berekening van het

effect van aanzuren op de N₂O-emissies zijn behalve de EF de volgende input parameters en aannames nodig: de verandering in effectieve N-gehalte in runder- en varkensmest, dat de besparing op kunstmest-N gelijk is aan de toename in het effectieve N-gehalte van de mest, het aantal bedrijven waar het Infarm systeem wordt geïmplementeerd, het aantal bedrijven en het aantal dieren per bedrijf. Aangenomen wordt dat het Infarm systeem op 25% van de bedrijven wordt geïmplementeerd. In paragraaf 3.4 is uitgewerkt dat aanzuren ertoe leidt dat het effectieve N-gehalte (TAN) in rundermest, afhankelijk van de grondsoort, toeneemt met gemiddeld 8, 10 en 16 kg N koe⁻¹ jr⁻¹ op respectievelijk zand-, klei-, en veengrond. In paragraaf 3.5 is uitgewerkt dat voor varkensmest het N-gehalte toeneemt met gemiddeld 2 kg N varken⁻¹ jr⁻¹. Dit wordt alleen toegediend op minerale gronden.

Tabel 8. Overzicht emissiefactoren (EF) voor directe N₂O-emissies uit de bodem en de daaruit berekende verandering in N₂O-emissie voor kunstmest en organische mest door aanzuren van mest. De netto verandering in N₂O-emissie is het verschil in emissieverandering tussen kunstmest en organische mest. De EF zijn uitgedrukt in % van het N dat vrij komt in de vorm van N₂O waarbij onderscheidt wordt gemaakt tussen minerale (Min.) en organische gronden (Org.). Een emissiereductie wordt weergegeven met een negatief getal, een emissietoename met een positief getal.

Bron	Emissie Factor N ₂ O (%)			Totale N ₂ O-emissie (Mton CO ₂ eq.)		Netto N ₂ O-emissie (Mton CO ₂ eq.)	
	Mest	Min.	Org.	Min.	Min. + Org	Min.	Min.+Org.
IPCC	Kunst	1,25	1,25	-0,056	-0,072		
IPCC	Org.	1,25	1,25			0	0
Kroeze 1994 / Kuikman et al. 2006	Kunst	1	2	-0,045	-0,086		
Kroeze 1994	Org.	2	2	0,090	0,115	0,04	0,06
Velthof & Oenema 1997	Org.	0,5	1	0,022	0,043	-0,02	-0,01
Kuikman et al., 2006	Org.	1,5	1,5	0,067	0,086	0,02	0,03

Tabel 8 geeft een samenvatting van de berekende netto verandering in N₂O-emissies in Mton CO₂ equivalenten door aanzuren van mest voor kunstmest en organische mest op basis van de verschillende EF. Door een besparing op kunstmest-N kan een emissiereductie van 0.04-0.09 Mton CO₂ equivalenten worden bereikt. Dit is een reductie van 4-7% in vergelijking met de landelijke directe N₂O-emissie uit de bodem door toedienen van kunstmest van 1,2 Mton CO₂ equivalenten (gebaseerd op van der Hoek et al. 2006). Door de toename in N-gehalte van de mest kan de N₂O-emissie toenemen. Deze toename varieert tussen 0,02 en 0,12 Mton CO₂ equivalenten. Dit is een reductie van 1-5% in vergelijking met de landelijke directe N₂O-emissie uit de bodem door toedienen van organische mest van 1,2 Mton CO₂ equivalenten (gebaseerd op van der Hoek et al., 2006).

Het netto verschil tussen de emissiereductie door een lagere kunstmestgift en een emissietoename door een hoger N-gehalte van de mest is zeer klein. Bij een aanname dat de EF voor kunstmest en organische mest gelijk zijn (IPCC) dan is er netto geen effect op de N₂O-emissie. Netto kan aanzuren van mest leiden tot een verandering in N₂O-emissie die varieert tussen een reductie van 0,02 tot een toename van 0,06 Mton CO₂ equivalenten. Deze verandering is klein (-0,5 tot 1%) ten opzichte van de directe N₂O-emissie uit de bodem (4,8 Mton CO₂ eq., Tabel 1).

Met rantsoenaanpassingen kan de CH₄-emissie uit de pens worden verlaagd (paragraaf 3.6.1). Het is mogelijk dat deze rantsoenaanpassingen effect hebben op het N-gehalte van de mest en daarmee ook op de directe N₂O-emissies. Op basis van het voorgaande wordt verwacht dat rantsoenaanpassingen een verwaarloosbaar klein effect hebben op de directe N₂O-emissie uit aangezuurde mest ten opzichte van onbehandelde mest.

Effect van aanzuren van mest op de indirecte N₂O-emissie

De reductie in NH₃-emissie zal leiden tot een afname van de indirecte N₂O-emissie door atmosferische depositie. De grote van deze emissiereductie is ongeveer 0,05 Mton CO₂ equivalenten. De indirecte N₂O-emissie is berekend op basis van de verandering in NH₃-N emissie en de N₂O-emissie factor (EF van 0,01 kg N₂O-N kg⁻¹ N, IPCC). Verder zijn dezelfde inputgegevens en aannames gebruikt als bij de berekening voor de directe N₂O-emissies.

De berekende emissiereductie van 0,05 Mton CO₂ eq. is een afname van ongeveer 10% ten opzichte van de totale indirecte N₂O-emissie door atmosferische depositie van NH₃ van 0,45 Mton CO₂ eq. (gebaseerd op van der Hoek et al., 2006).

Effect van hoger gehalte makkelijk afbreekbare C-verbindingen

Otteson et al. (2009) heeft laten zien dat de microbiële activiteit afneemt met het aanzuren van mest waardoor het gehalte makkelijk afbreekbare C verbindingen toeneemt. In potentie leidt dit tot een toename in de N₂O-emissie omdat naarmate meer makkelijk afbreekbaar koolstof (C) in de mest aanwezig is de N₂O-emissie toeneemt (Velthof et al., 2000). Op dit moment is het niet mogelijk om dit effect te kwantificeren. Hiervoor is nader onderzoek nodig.

3.6.4 Broeikasgasemissie samenvattend

Het aanzuren van mest zorgt voor een inhibitie van de microbiële activiteit in de mest door een sterke toename in vluchtige vetzuren in geprotoneerde vorm. Deze gereduceerde microbiële activiteit heeft voordelen vanuit oogpunt van de emissie van CH₄, H₂S, CO₂ uit opslag en stal en leidt tot een hoger C-gehalte van de mest. Dit laatste kan gunstig zijn wanneer de mest wordt gebruikt in een biogasreactor. Daarnaast heeft een lagere NH₃-emissie en een daar uit volgende hoger N-gehalte van de mest effect op de N₂O-emissie. In Tabel 9 zijn de effecten van aanzuren op de CH₄- en N₂O-emissie zoals berekend in de voorgaande paragrafen weergegeven.

Tabel 9: Effect van aanzuren op de CH₄- en N₂O emissie uit mest. Een toename in emissie wordt aangegeven met een +, een afname met een – en geen effect met een 0. Voor de berekeningen wordt de aanname gedaan dat het Infarm systeem op 25% van de melkvee- en varkensbedrijven wordt geïmplementeerd.

Effect aanzuren	Effect op Bkg-emissie		Grootte van het effect (Mton CO ₂ eq.)
	CH ₄	N ₂ O	
Verlaging microbiële activiteit mest in stal	–		-0,6*
Toedienen aangezuurde mest (Literatuur)		– / 0 / +	-0,18 / 0 / 0,25
Aanzuren in combinatie met mestscheiding (Literatuur)		–	-0,46
Lagere kunstmestgift		–	-0,06
Hoger N-gehalte mest		+	0,02 tot 0,12
Hoger gehalte makkelijk afbreekbare C mest		+	?
Lagere N depositie door lagere NH ₃ -emissie		–	-0,05

* aanname dat aanzuren leidt tot een CH₄-emissiereductie van 90%.

Het aanzuren van mest heeft effect op zowel de CH₄-emissie uit de stal als de directe en indirecte N₂O-emissie uit de bodem. Aanzuren heeft het grootste effect op de CH₄-emissie met een potentiële

emissiereductie van 0,6 Mton CO₂ eq. (Tabel 9). Voor de N₂O-emissie geven de twee relevante onderzoeken geen eenduidig beeld, zowel een emissiereductie als een emissietoename lijkt mogelijk. De gevonden grootte van de effecten is kleiner dan de reductie in broeikasgasemissie door CH₄. Op basis van berekeningen voor de Nederlandse situatie lijken de gecombineerde effecten van een N₂O-emissiereductie door lagere kunstmestgift en lagere NH₃-emissie (iets) groter dan de N₂O-emissietoename door een hoger N-gehalte van de aangezuurde mest. Dit verschil varieert tussen een emissiereductie van ongeveer 0.1 Mton CO₂ eq. en geen emissiereductie.

Samenvattend kan gesteld worden dat het aanzuren van mest met het Infarm systeem resulteert in een reductie van broeikasgasemissies. Dit wordt met name veroorzaakt door een sterke afname in CH₄-emissie uit de stal en opslag. Een reductie van de N₂O-emissie kan hier ook een kleine(re) bijdrage aan leveren.

3.7 Kosten

Bussink (2009) heeft berekend dat voor de Nederlandse melkveehouderij de netto kosten variëren tussen 54 en 87 € per dierplaats per jaar afhankelijk van, met name de grootte van het bedrijf (Tabel 10). Hoe groter het bedrijf hoe kleiner de kosten per dier omdat de systeemkosten relatief hoog zijn; €100.000,- aanschafkosten en €3.000,- voor jaarlijks onderhoud. In de berekening van Bussink (2009) worden behalve op N uit kunstmest ook kosten bespaard op S uit kunstmest. Wel worden kosten gerekend voor het toedienen van extra kalk aan de bodem omdat de bodem pH sterker daalt. Naast systeemkosten, is zuurverbruik de belangrijkste kostenbepalende factor.

In het kader van de beperking van de NH₃-emissies van in de buurt van Natura 2000 gebieden zullen melkveebedrijven die willen uitbreiden of hun stallen moeten vervangen op dit moment voor een emissie arme stal kiezen. De kosten voor een emissie arme stal zijn op dit moment ongeveer €100,- per m² duurder dan van een conventionele stal. Bij een oppervlak van 9 m² dier⁻¹ zal het grofweg €950 per dierplaats extra kosten om emissiearm te bouwen. Voor dit zelfde bedrag per dierplaats kan het Infarm systeem gedurende 10 tot 20 jaar worden toegepast. Voor grote bedrijven zijn de kosten voor het Infarm systeem dus vergelijkbaar met de extra kosten voor een emissiearme stal (ervan uitgaande dat een stal 20 jaar meegaat).

Wanneer de kosten worden uitgedrukt per kg NH₃-emissie is het Infarm systeem competitief. In het meest gunstige geval kan met een emissiearme stal een emissiereductie van 5 kg N dier⁻¹ jr⁻¹ worden bereikt en dan zijn de kosten 7,8 € per kg NH₃ per jaar. Bussink (2009) heeft berekend dat met het Infarm systeem de kosten variëren tussen 2,6 en 4,5 € per kg NH₃ per jaar. De lagere kosten per kg NH₃ worden veroorzaakt doordat met het aanzuren van de mest na excretie de NH₃-emissie uit de hele mestketen wordt gereduceerd.

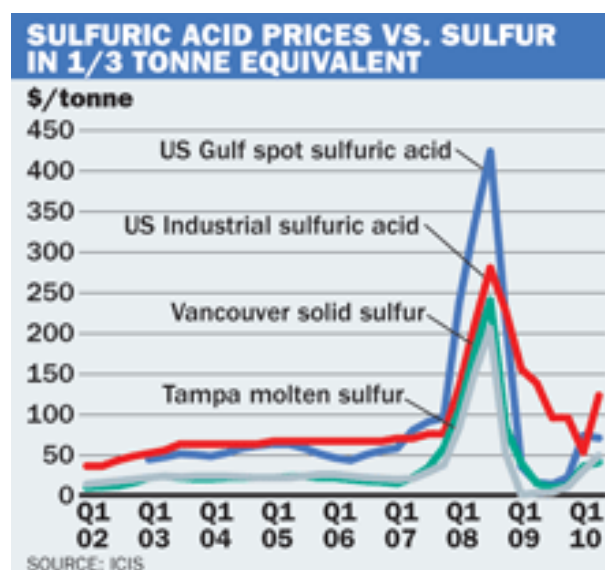
Door de potentiële reductie in CH₄-emissie heeft Bussink (2009) berekend dat de kosten voor het Infarm systeem 44 tot 72 € per bespaarde ton CO₂ equivalenten zijn. In een studie door Van Vuuren et al. (2006) is berekend dat om een reductie in broeikasgasemissie tussen 6 en 15% te realiseren de kosten variëren tussen respectievelijk 23 en 81 € per bespaarde ton CO₂ equivalenten. De kosten voor het Infarm systeem zijn dus van dezelfde orde van grootte als de te maken kosten voor het behalen van nationale klimaatdoelstellingen. Uit een vergelijkbare berekening zoals uitgevoerd voor de melkveehouderij (Bussink, 2009) blijken de kosten voor het implementeren van het Infarm systeem in de varkenshouderij uit te komen op gemiddeld ongeveer 8€ dier⁻¹ jr⁻¹ (Tabel 10). Dit is aanzienlijk lager dan per dierplaats in de melkveehouderij. Dit is met name het gevolg van het aantal dieren per bedrijf in de varkenshouderij groter (1200) is dan in de melkveehouderij. De verwachting is dat in 2020 het aantal varkens per bedrijf is toegenomen naar 3200 varkens per bedrijf en dat het aantal bedrijven sterk daalt. Hoe groter het bedrijf des te aantrekkelijker is het om het Infarm systeem te implementeren.

Tabel 10: Kosten voor het Infarm systeem uitgedrukt in € per dier per jaar voor de melkveehouderij en de varkenshouderij. Bij de melkveehouderij wordt onderscheidt gemaakt tussen het aantal dieren per bedrijf en permanent opstallen (Po) en beperkt weiden (Bw).

	<u>Per koe</u>			<u>Per varken</u>
dieren per bedrijf	300 po	150 po	150 bw	1200
Kosten				
Aanschaf en onderhoud apparatuur	33	67	67	8,8
Zuurverbruik	30	30	24	0,9
Extra kalk	14	14	11	0,4
Besparingen				
N-bemesting	18	18	15	2,0
S-bemesting	6	6	6	0,2
Totaal	54	87	80	7,8

In vergelijking met het implementeren van een emissiearme stal is het Infarm systeem goedkoper wanneer uitgedrukt per dierplaats. Voor het implementeren van een luchtwasser systeem zijn de kosten ongeveer 16 € dier⁻¹ jr⁻¹ (gebaseerd op 2100 dieren per bedrijf, Janssens 2004). Ook wanneer het wordt uitgedrukt in kg NH₃-emissie is het Infarm systeem concurrerend met het luchtwasser systeem. Uitgaande van de totale NH₃-emissiereductie (stal en toedienen) bij aanzuren.

Voor de kostenberekening is Bussink (2009) uitgegaan van een prijs van €100,- ton⁻¹. De prijs van H₂SO₄ is echter afhankelijk van vraag- en aanbod en is in het verleden (2008) sterk gestegen tot ruim €400,- ton⁻¹ (ICIS, Figuur 4). Ondertussen is de prijs weer gedaald tot ongeveer €100,- ton⁻¹. De verwachting is dat na 2010 de prijs stabiliseert door een balans in vraag- en aanbod (ICB). Een stijging van de prijs voor H₂SO₄ heeft een groot effect hebben op de totaal prijs voor het gebruik van het Infarm systeem. Indien in de toekomst de prijs weer sterk stijgt kan dit leiden tot een sluippost in de bedrijfsbegroting.



Figuur 4: Fluctuaties in prijs voor zwavelzuur tussen 2002 en 2010 (bron ICIS).

3.8 *Nader onderzoek en implementatiepotentieel in Nederland*

Met het Infarm systeem is het aanzuren van mest met H_2SO_4 tot pH 5,5 in een implementeerbaar stadium. De belangrijkste voor- en nadelen zijn in kaart gebracht. Een aantal belangrijke aspecten vergen nog nader onderzoek. Dit zijn:

- Het effect van aanzuren op de microbiële activiteit in mest en afbraaksnelheid van de mest en het dien ten gevolge vrijkomen van voedingsstoffen met name na toedienen aan de bodem.
- Het effect van aanzuren op N_2O -emissies uit de bodem na toedienen.
- Het effect van de voorgestelde voermaatregelen op broeikasgasemissies, NH_3 -emissies en zuurverbruik kan via een aanvullende studie nader worden gekwantificeerd om eventueel conflicterende resultaten voor de verschillende broeikasgassen en NH_3 uit te sluiten.

Het Infarm systeem biedt perspectief om in Nederland geïmplementeerd te worden met name voor relatief grote bedrijven.

4 Biologisch aanzuren van mest en innovaties uit Oostenrijk

4.1 Biologisch aanzuren

In het hiervoor besproken Deense Infarm systeem is het aanzuren van mest gebaseerd op het toevoegen van zwavelzuur. Dit is een sterk anorganisch zuur. Het is ook mogelijk om mest biologisch aan te zuren door middel van micro-organismen. Biologisch aanzuren is het gevolg van de productie van zuur bij het omzetten van fermenteerbare koolhydraten door micro-organismen (Lameijer & Vervoort, 1995, Hendriks & Vrielink 1997, Clemens & Wulf, 2005). Bijvoorbeeld het omzetten van glucose in melkzuur door melkzuur bacteriën:



Studies waarbij door biologisch aanzuren een pH reductie tot pH 5,5 of lager wordt bereikt laten een sterke reductie in NH_3 -emissie zien, zowel uit de stal (Hendriks & Vrielink, 1997) als bij toedienen (Clemens et al., 2002). Behalve door een verlaging van de pH kan de NH_3 -emissie ook worden gereduceerd doordat N wordt geïmmobiliseerd door vastlegging in micro-organismen. Omdat biologisch aanzuren nog in de onderzoeksfase zit, zijn geen studies bekend waar het effect op de emissie van broeikasgassen direct is onderzocht. In deze studie wordt hier theoretisch op ingegaan. De hypothese is dat, net als bij het gebruik van anorganische zuren, de methanogenese wordt stil gelegd wanneer de pH van de mest beneden pH 6 daalt (Oenema & Velthof, 1993). In Oostenrijk wordt sinds enkele jaren geëxperimenteerd met biologisch aanzuren van mest. Het in Oostenrijk gehanteerde systeem en experimentele resultaten worden apart besproken.

Het bevorderen van de productie van zuren in mest door micro-organismen kan op verschillende manieren. Deze variëren in het, al dan niet in combinatie, toevoegen van (Lameijer & Vervoort, 1995):

1. een organisch zuur om de pH van de mest te verlagen om de juiste omstandigheden voor een specifieke (groep) micro-organismen te creëren;
2. een ent van een specifiek zuurproducerend micro-organismen;
3. een voedingsbron in de vorm van makkelijk fermenteerbaar koolstof (C), bijvoorbeeld glucose;
4. micro-organismen of enzymen die in staat zijn macromoleculen af te breken tot substraten die als C-bron dienen voor de zuurproducerende bacteriën; en
5. colloïdaal materiaal waarop micro-organismen zich hechten, bijvoorbeeld zeoliet.

4.1.1 Voedingsbronnen voor micro-organismen

Om de zuurproducerende micro-organismen in mest te stimuleren / onderhouden kan een voedingsbron worden toegevoegd. Dit kan door direct een substraat in de vorm van een makkelijk fermenteerbare koolstof bron (C-bron) toe te voegen maar ook door het toevoegen van micro-organismen of enzymen die in staat zijn macromoleculen af te breken tot substraten die als C-bron dient voor de zuurproducerende bacteriën (Lameijer & Vervoort, 1995). In verschillende studies waar een C-bron direct wordt toegevoegd is of en hoeveel de pH van de behandelde mest daalt afhankelijk van het type toegevoegde C-bron. Ook is de snelheid waarmee de pH daalt afhankelijk van de C-bron. Bij sommige C-bronnen stijgt de pH weer nadat de pH van de aangezuurde mest een minimum heeft bereikt.

In het systeem beschreven door Hendriks & Vrielink (1997) werd varkensmest eerst aangezuurd met citroenzuur tot pH 6 en geënt met melkzuurbacteriën voordat een C-bron werd toegevoegd. Als C-bron bleek tarwezetmeel wel geschikt te zijn en het goedkopere aardappelzetmeel niet. Het gebruik van gemalen tarwe resulteerde in een daling van de pH van de mest tot 5,5 na 1 week.

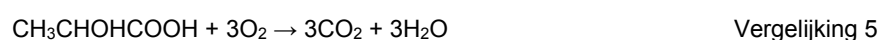
In tegenstelling tot Hendriks & Vrielink (1997) verlagen Clemens et al. (2002) de pH van rundermest niet voordat een C-bron werd toegevoegd en de mest werd ook niet geënt met specifieke micro-organismen. Zij laten de endogene micro-organismen het werk doen. Als voedingsbron werd sucrose, glucose, suikerbieten residu en bio-afval gebruikt. Bioafval was ongedefinieerd organisch huisvuil. Het toevoegen van zowel sucrose (concentratie $> 0,03 \text{ mol l}^{-1}$) als glucose (concentratie $> 0,1 \text{ mol l}^{-1}$) resulteerde in een snelle (< 65 uur) daling van de pH tot een minimum tussen 4,7 en 5,3. Het toevoegen van suikerbieten residu had zelfs bij een hoge dosis (330 g l^{-1}) slechts een gering effect op de pH. Bovendien nam de stank toe. Bij het toevoegen van bioafval daalde de pH langzaam (~ 200 uur) tot een pH van 4,7.

Tarwezetmeel, sucrose en glucose worden dus snel afgebroken tot organische zuren met een daling van de pH tot onder pH 5,5 binnen 1 week als gevolg. Bij alle drie deze C-bronnen steeg, na het bereiken van de minimum pH, de pH van de mest echter weer langzaam tot waarden ruim boven pH 6 na 0,8–1,3 weken (Clemens et al 2002) en na 4–8 weken (Hendriks & Vrielink, 1997). In latere experimenten van Clemens en Wulf (2005) bleek dat de pH meerdere weken stabiel kon blijven voordat deze weer ging oplopen. Van belang is ook of verse mest gebruikt wordt of mest die al een tijdje in de opslag zit en waar al allerlei omzettingsprocessen hebben plaatsgevonden. Lameijer et al. (1995) toonden aan dat de hoeveelheid zuur nodig om varkensmest aan te zuren bijna verdubbelde nadat de mest eerst 16 weken in een opslag had gezeten voordat er werd begonnen met aanzuren. Het is daarom mogelijk dat het aanzuren van de mest tot pH 6, het continu toevoegen van verse mest en/of het enten met extra micro-organismen in het systeem van Hendriks & Vrielink (1997) er toe leidde dat het langer duurde voordat de pH van de mest weer boven pH 6 steeg. Clemens & Wulf (2005) vonden eveneens dat bij regelmatig toevoegen van verse mest de pH langer stabiel kon worden gehouden.

De temperatuur is eveneens van grote invloed. Clemens & Wulf (2005) verkregen een beter resultaat bij 20°C dan bij 8°C . De pH daalde sneller en er kon een lagere pH worden bereikt.

Bij het toevoegen van bioafval daalde de pH langzaam maar bleef na het bereiken van deze lage pH gedurende de rest van de incubatie constant (Clemens et al. 2002). Voor de langere termijn en voor emissiereducties bij toedienen lijkt het gebruik van bioafval (ongedefinieerd organisch huisvuil) positief omdat de pH niet stijgt na het bereiken van een minimum. Omdat bioafval een heterogeen mengsel is moet met het gebruik ervan extra aandacht worden besteed aan andere componenten die hiermee worden toegevoegd aan de mest (bijvoorbeeld zware metalen en nutriënten) en veranderingen van de fysische eigenschappen van de mest.

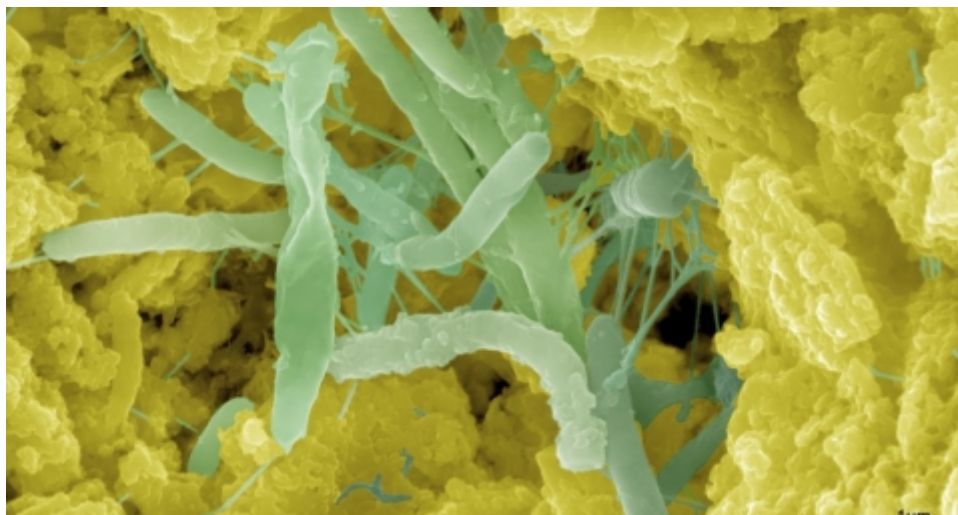
Dat de pH in sommige incubatie experimenten steeg nadat een minimum pH was bereikt kan door meerdere processen worden veroorzaakt (Clemens et al., 2002, Clemens & Wulf, 2005): i) de organische zuren vervluchtigen uit de mest, ii) de organische zuren aeroob worden afgebroken, of iii) de organische zuren anaeroob worden afgebroken tot CH_4 en CO_2 . Een voorbeeld is de aerobe en anaerobe afbraak van melkzuur:



Bij lage pH is de anaerobe afbraak onwaarschijnlijk omdat methanogenese wordt geremd bij een $\text{pH} < 6$ (Oenema & Velthof, 1993). Echter, als de pH stijgt kan dit proces wel weer een rol gaan spelen.

4.1.2 Zeoliet

In de Oostenrijkse proeven werd aan de mest zeoliet toegevoegd te samen met Kombioflor®, een additief met micro-organismen. De gedachte hierachter is om gunstige condities voor de micro-organismen te creëren, doordat zij zich hechten aan het oppervlak van de zeoliet, waarbij een soort biofilm ontstaat. Het toevoegen van zeoliet wordt toegepast in biogasinstallaties om de gasproductie te stimuleren. Uit een recente publicatie blijkt met een geactiveerde zeoliet in batch-culturen tot 53% meer biogas kon worden gewonnen (Weiß et al., 2010). De TU Graz heeft beeldmateriaal kunnen maken hoe zeoliet interacteert met micro-organismen (Figuur 5). Men noemt in Oostenrijk de zeoliet dan een migulator (een minerale bioregulator).

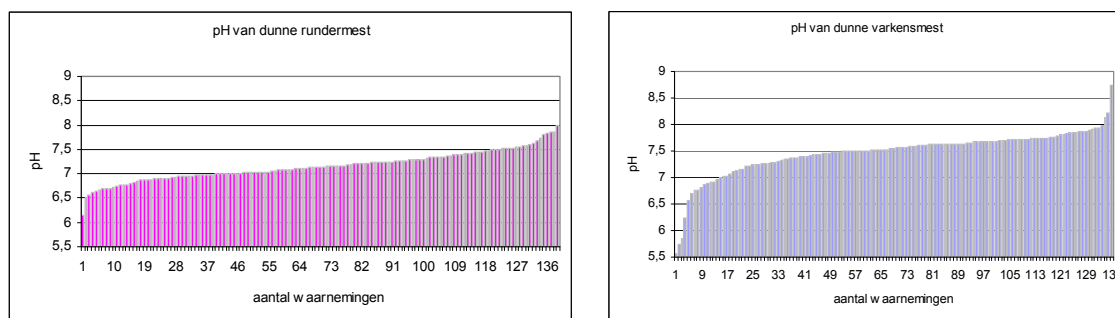


Figuur 5. De interactie van micro-organismen met zeoliet (Bron: <http://tuaustria.at/ans-licht-gebracht-mikroorganismen-auf-biogaskatalysatoren>).

4.1.3 De mestsamenstelling

In Oostenrijk zijn bijna 140 dunne runder- en 140 varkensmestmonsters onderzocht op de samenstelling (Figuur 6). Het bleek dat de pH sterk varieerde. Zo had respectievelijk 28% en 14% van de runder- en varkensmesten een pH lager dan 7. Deze verschillen worden toegeschreven aan het gevoerde rantsoen. In Nederland wordt zelden de pH van mest gemeten. Uit de beperkte gegevens die er zijn van rundvee blijkt eveneens een vergelijkbaar grote spreiding voor te komen. Sturen op het gevoerde rantsoen zou dus een interessante optie kunnen zijn om de ammoniakemissie terug te dringen, omdat daardoor mogelijk minder zuur nodig is om de mest op een gewenste pH te krijgen. Bekend is dat in de varkenshouderij additieven worden ingezet om de zuurgraad van de mest te verlagen.

In Oostenrijk hebben Somitsch & Wenzel een volautomatisch systeem ontwikkeld waarbij de pH van mest over internet kan worden gevolgd. Op twee rundveebedrijven is de pH gedurende langere tijd gemeten. Op één van deze bedrijven deden zich sterke schommelingen voor in de pH van de mest (soms meer dan 1 pH eenheid). Deze pH verandering kon gekoppeld worden met een wijziging van het rantsoen.



Figuur 6. De pH van dunne runder- en varkensmest in Oostenrijk (bron: Wenzl pers mededeling).

4.1.4 Effect van biologisch aanzuren op NH_3 -emissies en N-gehalte mest

Verschillende studies laten een positief effect zien op de NH_3 -emissie door biologisch aanzuren. In een onderzoek met biologisch aangezuurd varkensmest (citroenzuur tot pH 6, geënt met melkzuurbacteriën waarna deze buiten de stal werd gemixt met gemalen tarwe) daalde de pH tot gemiddeld 6,1 over 15 weken (Hendriks & Vrieling, 1997). Dit resulteerde in een NH_3 -emissie uit de stal van 1,1 en 1,0 kg $\text{NH}_3\text{-N}$ dierplaats⁻¹ jr⁻¹. Ten opzichte van de emissie uit een conventionele koeienstal is dit een reductie van zo'n 88%. In een ander onderzoek (Clemens et al., 2002) resulteerde het gebruik van biologisch aangezuurd rundermest (0,1 mol l⁻¹ glucose, pH 5,9) in een lagere NH_3 -emissie na toedienen in vergelijking met onbehandelde mest. Dit was met name duidelijk gedurende de eerste 20 uur na toedienen (81% emissie reductie). De totale cumulatieve emissiereductie na toedienen was 41%. In een onderzoek van Berg et al. (2006) is het effect van het direct toevoegen van melkzuur onderzocht in incubatie experimenten in het lab. Het melkzuur is dus niet ontstaan door biologische omzetting van koolhydraten en gedurende het experiment moest de pH drie keer naar beneden werd aangepast door extra melkzuur toe te voegen. Bij aanzuren variërend tussen pH 5,7 en 4,2 werd een reductie in NH_3 -emissie vastgesteld tussen 65 en 88%. Deze studies laten zien dat biologisch aanzuren in potentie de NH_3 -emissie zowel uit de stal (Hendriks en Vrieling 1997, Berg et al. 2006) als bij toedienen (Clemens et al 2002) sterk kan reduceren. De studies geven geen uitsluitel of het toedienen van organisch zuur en/of het enten van de mest met specifieke micro-organismen essentieel is om een pH reductie te bereiken. Het toevoegen van een bepaalde C-bron lijkt wel noodzakelijk om de pH van mest te verlagen. Lameijer & Vervoort (1995) gaan ervan uit dat het nodig is om de initiële pH één keer te verlagen tot ongeveer 6,5 omdat anders de specifieke micro-organismen niet in staat zijn zuur te produceren.

4.1.5 Effect van biologisch aanzuren op broeikasgasemissies

Zover bekend, zijn er geen studies die direct het effect van biologisch aanzuren op CH_4 -, N_2O - en CO_2 -emissies beschrijven. In een onderzoek van Berg et al. (2006) is wel het effect van het toevoegen van melkzuur op de CH_4 -emissie onderzocht. Bij aanzuren variërend tussen pH 5,7 en 4,2 bedroeg de reductie in CH_4 -emissie tussen 91 en 98%. De methanogenese werd dus bijna geheel stil gelegd. Dit is in overeenstemming met de resultaten waarbij mest wordt aangezuurd met anorganisch zuur (Oenema & Velthof, 1993, Ottosen et al., 2009). Zolang de pH van de mest onder pH 6 ligt wordt de methanogenese geremd. Het lijkt erop dat dit onafhankelijk is van de manier waarop de mest is aangezuurd. Verschillende studies laten echter zien dat na verloop van tijd de pH van mest na biologisch aanzuren stijgt, waardoor de methanogenese weer op gang kan komen. In de studie door Berg et al. (2006) werd dit voorkomen door op verschillende tijdstippen extra melkzuur toe te voegen.

De methanogenese is afhankelijk van de redoxpotentiaal van mest. Oenema & Velthof (1993) vinden een

veel hogere redoxpotential (Eh 100 tot 400 mV) in de aangezuurde mest (HNO_3 pH<5) in vergelijking tot onbehandelde mest die sterk anaeroob was (Eh $\pm$ -400 mV). Vanuit oogpunt van biogas productie is bekend dat de redoxpotential beneden de -250 tot -330 mV behoort te liggen voor een goede methaanproductie.

Door het toevoegen van een extra C- bron aan de mest wordt de lokale C-cyclus waarin CO_2 door het gewas wordt vastgelegd en weer vrijkomt bij afbraak van mest, verstoord. De pH stijging in de incubatie experimenten duidt er op dat de gevormde biologische zuren worden afgebroken dan wel vervluchtigen (Clemens et al., 2002). Het toevoegen van een extra C-bron leidt dus tot een extra emissie van CO_2 en/of organische zuren en eventueel CH_4 wanneer de pH weer boven 6 stijgt. Op de lange termijn zal alle extra toegevoegde C weer vrijkomen. Om een netto positief resultaat te verwezenlijken op het gebied van broeikasgasemissies moet de hoeveelheid CO_2 equivalenten die vrijkomt bij afbraak van de extra C-bron die aan de mest wordt toegevoegd niet groter zijn dan de reductie in CH_4 -emissie uit de mest. Dit dient nader onderzocht te worden. Hierbij moet ook worden meegenomen dat een toename in gemakkelijk afbreekbare C-verbindingen ook resulteert in een toename in de N_2O -emissie (Velthof et al., 2000). Indien de mest uiteindelijk gebruikt wordt in een biogasreactor kan een hoger C-gehalte van de mest juist voordelen hebben. Er is dan meer gemakkelijk afbreekbaar C aanwezig hetgeen gunstig is voor de biogas productie.

Mest met een hoger gehalte aan acetaat heeft ook effect op het bodemleven. In een studie van Krüsel et al. (1999) wordt gesuggereerd dat de aanwezigheid van acetaat gunstig is voor biologische processen in de bodem. In een recente studie van Laughlin et al. (2009) vindt men dat acetaat de vorming van N_2O uit NH_4^+ in de bodem stimuleert. Het zijn vooral fungi die verantwoordelijk zijn voor de N_2O productie. Zit de acetaat echter in mest dan is deze stimulering veel geringer. De experimenten van Laughlin et al. (2009) zijn uitgevoerd in het lab met gedroogde gronden en niet in situ. Laughlin et al. (2009) concluderen dat meer onderzoek nodig is naar het effect van acetaat in mest en het effect van andere ingrediënten in mest op het niveau en de snelheid van N omzettingen.

Op basis van het bovenstaande is nader onderzoek nodig naar wat het effect is van biologisch aanzuren op N_2O emissies, omdat na toediening aan de bodem er mogelijk meer N_2O vrijkomt.

4.1.6 Kosten biologisch aanzuren algemeen

Ondanks de lage NH_3 -emissie uit de stal werd het microbieel aanzuren door Hendriks & Vrielink in 1997 niet praktijkrijp bevonden door de hoge kosten. Deze kosten werden met name (voor $\frac{2}{3}$) veroorzaakt door de extra C-bron die moest worden toegevoegd. De kosten voor het gebruik van warmte behandelde aardappelzetmeel waardoor koud oplosbaar aardappelzetmeel ontstaat in plaats van tarwezetmeel zijn aanzienlijk lager. Er werd gesuggereerd dat het gebruik van koud oplosbaar aardappelzetmeel goed zou werken maar dit is niet onderzocht. De auteurs suggereren ook een mogelijk grote kostenbesparing met het gebruik van fermenteerbare componenten uit de voedingsindustrie. Net als het gebruik van bioafval moet met het gebruik hiervan extra aandacht worden besteed aan andere componenten die hiermee worden toegevoegd aan de mest (bijvoorbeeld zware metalen en nutriënten) en veranderingen van de fysische eigenschappen van de mest.

Op dit moment is meer onderzoek nodig om een goede kostenindicatie te kunnen geven van het biologisch aanzuren van mest waarbij behalve de reductie in NH_3 emissie ook de reductie in broeikasgasemissie wordt meegenomen.

4.2 Ervaringen in Oostenrijk

4.2.1 Achtergrond

In Oostenrijk is er niet alleen een probleem met de NH_3 -emissie maar ook met de mestgeur (mest wordt vooral bovengronds toegediend) en de viscositeit van “dunne” mest (moeilijk verwerkbaar). Daarnaast maakt men zich in toenemende mate zorgen om de uitstoot van broeikasgassen, ook uit de veehouderij. De vraag die Somitsch et al. (2008) en Wenzl et al. (2009) zich hebben gesteld is of deze problemen niet in één keer kunnen worden aangepakt. Daartoe wordt sinds enkele jaren gewerkt aan een bepaalde manier van biologisch aanzuren van mest door een vorm van gereguleerde fermentatie. Deze aanpak hanteert de volgende uitgangspunten:

- Mestbehandeling dient zoveel mogelijk in verse toestand plaats te vinden om zo de productie van geurstoffen door microbiële omzettingen zoveel mogelijk te vermijden (De vorming van geurstoffen wordt vooral door bepaalde micro-organismen veroorzaakt).
- De microbiële populatiedynamiek laat zich door de toevoer van zuurstof sturen.
- Het omlaag brengen van de pH door toevoer van zuur verandert de microbiële populatie. Daardoor daalt de NH_3 -emissie en wordt de emissie van CH_4 sterk beperkt.

Met deze aanpak wordt getracht zo goed mogelijk te anticiperen op de aanwezig flora in de mest door toepassing van een soort fermentatietechniek zoals deze ook bekend is uit de biotechnologie met mengpopulaties van micro-organismen. Men probeert in deze mestfermentatietechniek te sturen door gerichte ingrepen in het mestmilieu. De belangrijkste stuurparameters daarbij zijn de toevoer van zuurstof en de sturing van de pH daar deze beide een grote invloed hebben op de groeikarakteristiek van micro-organismen in mest (Hölscher, 2005). De bedoeling is het mestmilieu beter geschikt te maken voor micro-organismen die of melkzuur of kooldioxide, ethanol en azijnzuur produceren. Lactobacilli en Bacillus sp. bijvoorbeeld kunnen ammoniumstikstof in de vorm van polyglutaminezuur binden in exopolymereen waardoor een verschuiving van minerale stikstof naar organische stikstof plaats vindt (Pötter et al., 2001). Beide soorten kunnen groeien onder micro-aerofiele omstandigheden in tegenstelling tot bijvoorbeeld Eubacterium en Clostridia (belangrijke stankveroorzakers in mest).

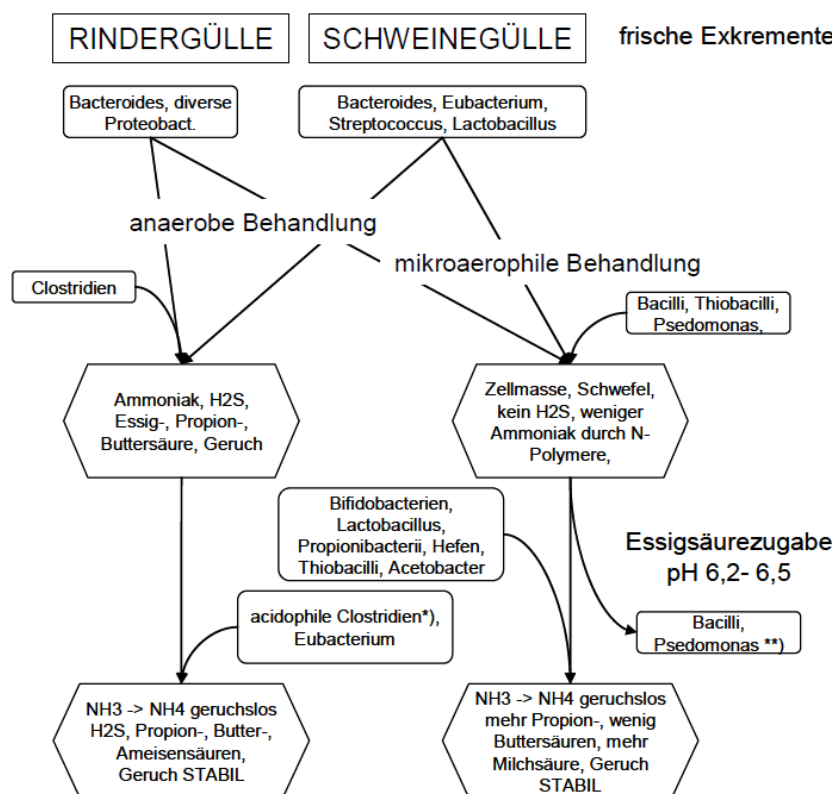
Het basisconcept van micro-aerofiele fermentatie is in Figuur 7 weergegeven. Hierbij worden naast het verlagen van de initiële pH van de mest door een organisch zuur (azijnzuur of melkzuur, Hölscher, 2005, Husted et al., 1991) en of een gemakkelijk afbreekbare C-bron (Clemens & Wulf, 2005,) ook andere additieven toegevoegd. In de Oostenrijkse proeven is azijnzuur als organisch zuur gekozen omdat het het breedste werkingsspectrum heeft met betrekking tot microbiële groei, relatief goedkoop is en geen neveneffecten heeft zoals corrosie van metaal. Daarnaast is getest wat het effect is van het toevoegen van:

- een makkelijk fermenteerbare C-bron in de vorm van melasse (voor de stimulering van saccharolytische organismen);
- een medium voor micro-organismen om op te hechten in de vorm van zeoliet; en
- het enten van de mest met de zuurproducerende bacterie Lactobacillus, aanwezig in het additief Kombioflor® om de werking van de Lactobacillus flora in de mest te versterken.

Met deze aanpak wordt een gerichte fermentatie van verse dunne mest nagestreefd door te pH te verlagen naar licht zuur (5-6) onder micro-aerofiele omstandigheden met toevoeging van additieven om de populatiedynamiek gericht te sturen om zo:

- de emissie van ammoniak en zwavelwaterstof te verminderen;

- de geuremissie te verminderen;
- minerale stikstof voor een deel om te zetten naar organische stikstof; en
- de vloeibaarheid van mest te verbeteren.



*) z.B. *C. butyricum*; *C. tyrobutyricum*: $5,3 < \text{pH} < 7,0$; *C. sphenoides*: $6,7 < \text{pH} < 7,0$

**) *Bacillus*, *Pseudomonas* verschwinden im sauren pH

Figuur 7. Het Microbiologische concept van een gereguleerde biotechnologische dunne mest fermentatie (Somitsch et al., 2008).

4.2.2 Eerste proeven en waarnemingen

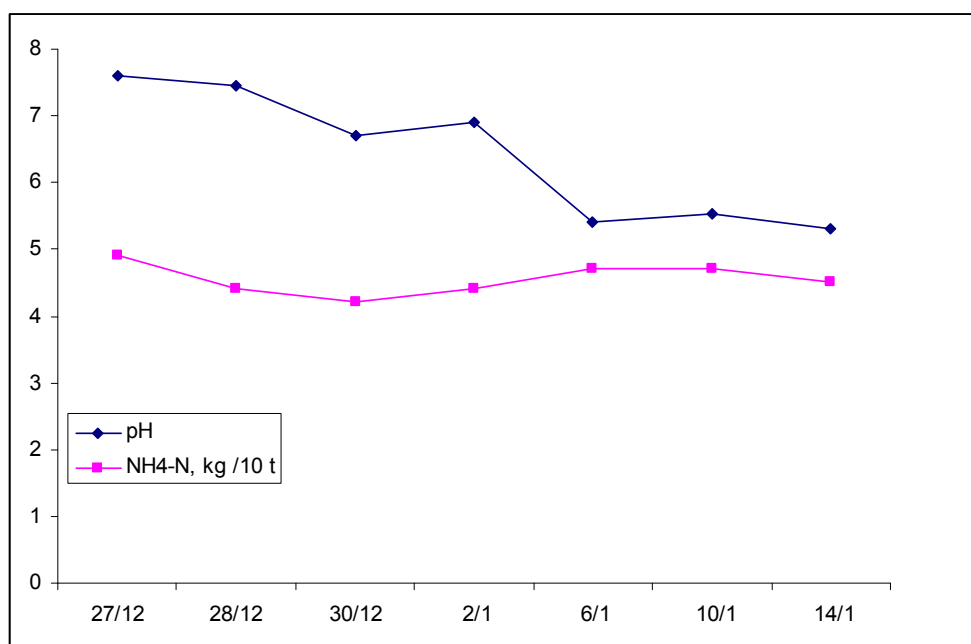
De proeven zijn op labschaal en “praktijkschaal” uitgevoerd. Voor de labproeven werd gebruik gemaakt van een fermentatievat (150 liter), de “Gukon”, met een mestroervoorziening inclusief een meetinrichting voor pH, temperatuur en geleidbaarheid (als indicator voor de omzetting van minerale stikstof naar organische gebonden stikstof). Voor de test op praktijkschaal werd een Gukon van 3 m³ gebruikt.

Labproeven

Bij de eerste proef eind 2007 werd 120 liter dunne rundermest met ongeveer 3% ds en een N- en NH₄-gehalte van respectievelijk 1,37 en 0,49 g/kg gebruikt. Na toedienen van azijnzuur (1 liter, 30%) daalde de pH van 7,6 naar 6,7 om begin januari weer licht te stijgen (Figuur 8). Daarop is nogmaals azijnzuur toegevoegd (1 liter 10%) en werd zuurstof toegevoegd aan de mest. De pH daalde naar 5,3 aan het eind van de proef op 14 januari. Eerder is aangegeven dat voor mest met 4,1 kg N m⁻³ ongeveer 9,7 kg zwavelzuur nodig. Voor de Oostenrijkse mest omgerekend naar 4,1 kg N m⁻³ komt de hoeveelheid azijnzuur overeen met 9 kg zwavelzuur.

Een tweede proef werd identiek aan proef 1 uitgevoerd (mest afkomstig van hetzelfde bedrijf), waarbij na 18

dagen de mest werd opgeslagen in een separaat vat. Eén keer per dag vond er beluchting gedurende 1 uur plaats. De aangezuurde mest had een pH van 5,7 welke na een opslag van bijna 60 dagen niet gewijzigd was. Een gelijke opzet maar nu met membraambeluchting bleek niet te werken door verstopping. In een derde proef werd 120 liter dunne rundermest met een hoger drogestofgehalte (7,7%) en een N-gehalte van 4,2 g/kg gebruikt. Daaraan werd 1 liter azijnzuur (30% toegevoegd) dit leidde tot een pH-daling tot 6,6 na 2 dagen om na 10 dagen opgelopen te zijn naar pH 7. Deze pH bleef gedurende 40 dagen tot het einde van de proef gehandhaafd. De hoeveelheid zuur was te weinig om een pH van ongeveer 6 te realiseren. De viscositeit van de mest nam heel sterk af kort na aanzuren.



Figuur 8. Het pH en NH4-N-gehalte verloop na toevoeging 1 liter azijnzuur (30%) plus 150 gram zeoliet en 1 liter Kombioflor bij aanvang op 27 december en toevoegen van 1 liter azijnzuur op 4 januari. De mesttemperatuur bedroeg 15 °C (proef 1 naar Somitsch et al., 2008).

In een vierde proef werd dunne rundermest met een drogestofgehalte van 6% gebruikt. Deze mest werd door continu toevoegen van azijnzuur op een pH van 6 gehouden. Vervolgens werd dagelijks gedurende een periode van twee weken 10 kg faeces toegevoegd na 10 liter mest uit de Gukon te hebben verwijderd. Deze werd separaat opgeslagen. In totaal bleek 8 liter azijnzuur nodig te zijn, omgerekend naar zwavelzuur zou dit 20 kg per m³ betekenen.

Geconstateerd is dat er segregatie optrad en er minder stank was. Op de bodem van de Gukon ontstond een actieve slurry, waarvan de auteurs (Somitsch et al., 2008) verwachten dat die het fermentatieproces ingang kan houden bij continu toevoer van verse dunne mest.

Praktijkproef

De praktijkproef werd gedurende 10 dagen uitgevoerd in december 2008 op een biologisch melkveebedrijf. Van 6 melkkoeien die 250-300 liter dunne rundermest produceren is 3 keer per dag mest (automatisch) overgebracht naar de Gukon van 3 m³. Bij de start werd 23 liter azijnzuur (60%) gegeven en 6 dagen later nogmaals 20 liter. Door de lage temperaturen daalde de mesttemperatuur naar 2 graden. Daarop is halverwege de proef de Gukon afgedekt met stro waarop de mesttemperatuur steeg naar 6 graden. De mest pH daalde van initieel bijna 8 naar 7. Deze pH bleef ongeveer 7. Toevoegen van 25 kg melasse op de voorlaatste dag leidde tot een pH daling van 7 naar 6.5. Na afloop werd de mest nog een tijd opgeslagen.

Membraambeluchting van deze opgeslagen mest bleek goed te werken voor het handhaven van de micro-aerofiele condities. Voor een succesvolle aanpak moet de mesttemperatuur kennelijk beduidend hoger zijn.

4.2.3 Kosten biologisch aanzuren met de Oostenrijkse innovatie

Somitsch et al. (2008) hebben berekend dat het systeem ongeveer 850 euro aan investeringskosten per grootvee eenheid (GVE) vergen op basis van een veebestand met 20 GVE. De variabele kosten variëren tussen de 3,90 en 5,40 Euro per m³ mest. Daarbij zijn de kosten het hoogst in de winter. Bij een levensduur van het systeem van 10 jaar komen de investeringkosten neer op ongeveer 5 euro per dier. Voor grote bedrijven is dit naar onze inschatting fors lager. Stel dat het dan 2,50 euro per dier zou bedragen dan komen de totale kosten overeen met ruim 7 euro per m³ mest ofwel ongeveer 175 euro per dier bij het hele jaar op stal staan.

Van groot belang voor de totale kosten is de prijs van azijnzuur (40 cent per liter bij een gebruik van 8 tot 10 liter per m³ mest). Bij deze prijs en gebruik bepaalt de prijs voor azijnzuur ruim 50% van de kosten in de berekeningen van Somitsch et al. (2008).

Op basis van deze kostencalculatie is het systeem ruim 50% duurder dan het Infarm systeem. Opgemerkt moet worden dat de benodigde hoeveelheid aanzijnzuur nog punt van onderzoek is. Indien uit procesoptimalisatie blijkt dat azijnzuur in veel minder mate nodig is of alleen nodig is bij het opstarten van het aanzuursysteem dan neemt de aantrekkelijkheid van het systeem sterk toe.

4.2.4 Eerste conclusies Oostenrijks systeem

Op basis van deze eerste proeven concluderen de auteurs dat door biologisch aanzuren er ammonium is ingebouwd in de organische massa, dat de viscositeit van de mest sterk afneemt, de geur afhankelijke van de precieze procesinrichting afneemt en dat toevoegen van melasse zinvol kan zijn vooral bij lage temperaturen. Aangezuurde mest blijft bovendien gedurende langere tijd op de ingestelde lagere pH indien deze beneden de 6 ligt. Op basis van proeven kan echter nog niet eenduidig de conclusie worden getrokken dat initieel aanzuren met azijnzuur - in combinatie met een beperkte beluchting en het toevoegen van additieven (zeoliet en Kombioflor, een toevoegmiddel met melkzuur bacteriën) – volstaat voor het opgang houden van het aanzuurproces.

In de proeven zijn geen directe ammoniak- en methaanemissiemetingen uitgevoerd. De focus lag op het ervaring opdoen met het proces. Inmiddels is duidelijk dat de redoxpotentiaal een belangrijker criterium is dan de pH met betrekking tot de sturing van het fermentatieproces (Somitsch pers mededeling). Natuurlijk blijft de pH een belangrijk parameter als het gaat om het beoordelen van de drijvende kracht voor ammoniakemissie. Vervolgonderzoek is in het voorjaar van 2011 gestart.

4.2.5 Vervolgonderzoek in 2011

Er is contact gezocht met Wenzl en Somitsch. In het voorjaar van 2011 is een groot vervolgproject begonnen (MINAMMON). Kerngedachte is dat de fermentatie van mest stuurbaar is mede gebaseerd op het feit van de eerste proeven en dat mestmonsters voor een deel uit zich zelf al een pH van beneden de 7 hebben. Het onderzoek richt op een gehele bedrijfsbenadering waarbij 10 rundveebedrijven betrokken zijn en dat begint bij de voeding en eindigt bij de mest. In verschillende onderdelen van de keten worden daartoe hulpmiddelen ingezet bestaande uit melkzuurbacteriën en zeoliet. De reden hiervan is dat men veronderstelt zo het grootste effect te bereiken. Het voortraject (de voeding) bepaalt mede de kwaliteit van de mest en biedt mogelijkheden om op een gewenste kwaliteit te sturen, zodat de inspanningen om mest aan te zuren geringer zullen worden (naar verwachting). Men focust op de volgende maatregelen:

1. Verbetering van de voervertering door het dier;
2. Snelle verwijdering van excrementen van het vloeroppervlak;
3. Toepassing van migulatoren voor de stalhygiëne;
4. Toepassing van micro-organismen voor de stalhygiëne;
5. Toepassing van organische zuren om de pH van mest te verlagen; en
6. Een eenvoudige pH-kontrolsysteem.

Men verwacht de ammoniakemissie minimaal met 35% te kunnen verminderen onder Oostenrijkse omstandigheden waarbij de mest bovengronds wordt uitgereden.

1. Voervertering

De omstandigheden voor ruwvoerproductie zijn in Oostenrijk minder gunstig dan in Nederland. Vaak uit zich dat in een mindere ruwvoer kwaliteit en meer verschillen tussen partijen ruwvoer. Bij de ruwvoederwinning wordt daarom een silage middel gebruikt bestaande uit verschillende melkzuur species.

2. Snelle verwijdering excrementen

Door mest en urine snel te verwijderen worden omzettingen beperkt en de efficiëntie van het proces vergroot. Omdat er meer gemakkelijk fermenteerbare C aanwezig is laten mest en urine zich zo als dunne mest beter fermenteren. Bovendien is er naar verwachting minder ammoniakemissie door minder omzetting van ureum.

3. Migulatoren voor de stalhygiëne

Er wordt geëxperimenteerd met het toedienen van zeoliet (van een hoge kwaliteit) voor stankvermindering maar ook voor het creëren van betere omstandigheden voor gewenste bacteriën (melkzuurbacteriën). Mogelijk wordt ook zeoliet aan het voer toegevoegd. Vanuit de literatuur is bekend dat dit soms voordelen biedt voor diergezondheid en melkproductie.

4. Micro-organismen voor de stalhygiëne

In stallen wordt een sproei-installatie aangebracht waarmee een oplossing met micro-organismen (vooral melkzuurbacteriën) wordt verneveld.

5. Toepassing van organische zuren

Detailonderzoek met modelopstellingen en later ook een systeem voor in de praktijk zal moeten uitwijzen hoe de procescondities optimaal in te richten zijn om mest aan te zuren met een minimale inzet van hulpmiddelen. Bij het opstarten van het systeem dient mest eerst aangezuurd te worden met azijnzuur tot de gewenste pH. Er wordt zeoliet en melkzuurstam(men) toegevoegd, maar mogelijk is dat ook niet nodig omdat op basis van de bedrijfsbenadering deze al in voldoende mate aanwezig zijn in de mest. Nagegaan wordt in hoeverre eenmalig aanzuren volstaat indien continu of discontinu mest wordt toegevoegd en of er regelmatig azijnzuur of een goedkope energiebron nodig is om voldoende zuur te produceren opdat de pH voldoende laag blijft en de redoxpotentiaal optimaal is voor micro-aerofiele fermentatie. Bij de modelopstelling zal de CH_4 en NH_3 -emissie worden gemeten.

6. Een eenvoudig pH- controle systeem

Vooronderzoek heeft uitgewezen dat de pH van mest sterk kan variëren. Door de mest pH te meten kunnen veranderingen tijdig worden opgemerkt. Er is een systeem beschikbaar waarmee ook de pH in de pens van de continu kan worden gemeten en waarvan de data via internet ingezien kunnen worden. Ook met dit systeem kunnen vroegtijdig problemen worden onderkend en kunnen er rantsoenaanpassingen plaatsvinden. Dit systeem wordt inmiddels ook in Nederland uitgetoetst op praktijkbedrijven.

Behalve onderzoek naar hoe het systeem in te richten wordt ook gekeken naar de bedrijfseconomie. Een aspect dat daarbij ook een rol speelt is of de mest vanuit de opslag direct naar het veld gaat om bovengronds te worden toegediend of dat het vanuit de opslag doorgaat naar een biogas installatie om de methaan vergisting juist weer op gang te brengen. In dat geval mag de procesinrichting bij het aanzuren van mest anders zijn. Zo zouden meer en of duurdere organische C-bronnen kunnen worden toegevoegd. Deze C vertaalt zich uiteindelijk ook in een hogere CH_4 -productie in de biogasinstallatie.

4.3 Nader onderzoek en implementatiepotentieel in Nederland

Het biologisch aanzuren vergt nog veel onderzoek naar het optimaal inrichten van het systeem om de kosten van toevoegmiddelen te minimaliseren. In principe is het systeem nu al implementeerbaar (in 1997 is er door Hendriks & Vrielink zelfs ervaring op praktijkschaal mee opgedaan) maar het kan tot hoge kosten leiden omdat de optimale procescondities onvoldoende bekend zijn. De focus voor aanvullende onderzoek ligt vooral op:

- Het inrichten en optimaliseren van procescondities via batch experimenten. Hierbij moet gemonitord worden op zowel pH als redoxpotentiaal. Nagegaan dient te worden wat het effect is van additie van micro-organismen (melkzuurbacteriën) en zeoliet opdat met zo min mogelijk hoeveelheid (azijn)zuur, of gemakkelijk afbreekbare C-bronnen kan worden volstaan. Ook dient onderzocht te worden in hoeverre de temperatuur van invloed is.
- Het maken van een goede inschatting van het effect van biologisch aanzuren op de netto emissie van broeikasgassen (CH_4 , CO_2 en N_2O).
- In hoeverre de mestkwaliteit te beïnvloeden is via de voeding opdat het biologisch aanzuren beter verloopt met minder inzet van additieven. Betekent dat er voor een laag zuurgebruik/productie er gestreefd dient te worden naar N-arme rantsoenen (zoals bij anorganisch aanzuren) zodat mest met weinig N verkregen wordt.
- Bij het toevoegen van een goedkope niet goed gedefinieerde C-bron moet goed worden opgelet op het toevoegen van andere componenten in de voedingsbron zoals zware metalen en voedingsstoffen.

Het biologisch aanzuren van mest is een methode die zich nog in de onderzoeksfase bevindt. De eerste resultaten zijn veel belovend wat betreft de reductie in NH_3 -emissie uit de stal en na toedienen. Het lijkt er ook op dat CH_4 -emissie sterk wordt gereduceerd als de pH van de mest onder pH 6 blijft. De methode vergt nog nadere uitwerking voordat het kan worden geïmplementeerd in de praktijk.

Welke schaalgrootte gewenst is om dit systeem toe te passen is niet zonder meer duidelijk. Gezien de schaalvergroting in de Nederlandse melkveehouderij is de verwachting dat de meeste bedrijven groot genoeg zijn om de techniek toe te passen. De basisvraag is veel meer of het biologisch aanzuursysteem zo is in te richten dat de variabele kosten laag zijn.

5 Ontwikkelingsperspectief voor Nederland

5.1 Een gecombineerd systeem

Er zijn twee routes voor aanzuren beschikbaar/in ontwikkeling. De één is gebaseerd op het toevoegen van anorganische zuur (zwavelzuur) en de andere is gebaseerd op het stimuleren van mestfermentatie waarbij door micro-organismen zuur wordt gevormd, verder ondersteund door het toevoegen van een zuur of gemakkelijk afbreekbaar C om een voldoende lage pH te realiseren. Beide processen hebben voor- en nadelen (Tabel 6.1), maar idealiter heeft het biologisch aanzuren de voorkeur zeker indien dat kan zonder of met een minimale hoeveelheid aan toevoegmiddelen.

Tabel 5.1. De voor- en nadelen van aanzuren met zwavelzuur en biologisch aanzuren.

Aanzuren met zwavelzuur	Biologisch aanzuren
Voordeel	
- proces is operationeel in Denemarken	- minder aanvoer van verzurende componenten nodig
- relatief goedkoop	- natuurlijk proces
	- goed voor de bodem $\leftrightarrow$ extra N_2O
	- mogelijk secundaire voordelen met betrekking tot stalklimaat en diergezondheid
- minder NH_3 -emissie	- minder NH_3 -emissie
- minder CH_4 -emissie	- minder CH_4 -emissie
- mogelijk minder N_2O -emissie	- mogelijk minder N_2O -emissie
Nadeel	
- hoge aanvoer van zwavel; van invloed op spoorelementen voorziening van rundvee en waterkwaliteit.	- proces sturing nog niet uit ontwikkeld
- risico's verbonden aan werken met agressief zuur	- het netto effect op broeikasgasemissies niet bekend
- mogelijk stankoverlast en gezondheidsrisico's door productie van bepaalde vluchtige vetzuren en S-verbindingen	- lijkt relatief duur

Denkbaar is echter ook een mix van beide systemen van aanzuren, juist voor de korte en middellange termijn. De insteek zou daarbij als volgt kunnen zijn. Er wordt gekozen voor biologisch aanzuren als basisconcept. Daarbij wordt het systeem zo ingericht wordt dat toevoegen van zwavelzuur, azijnzuur of een goedkope C-bron tot de mogelijkheden behoort. De voordelen van een dergelijke benadering zijn dat :

- van risicospreiding; de marktprijs van zwavelzuur of azijnzuur of die van een goedkope C-bron bepaalt wat wordt toegevoegd;
- het in mest aanwezige verzurend potentieel in de vorm van gemakkelijk fermenteerbare C eerst wordt benut waardoor al een zeker pH verlaging wordt bereikt. Voor de verdere daling van de pH wordt gezorgd door toevoegen van zwavelzuur, azijnzuur of een goedkope C-bron (Op basis van de beperkte literatuur maakt het niet uit of zwavelzuur of organisch zuur wordt gebruikt om micro-organismen azijnzuur te laten produceren);

- men direct kan starten met een dergelijk systeem, immers men kan altijd de pH op een gewenst niveau krijgen, in het ongunstigste geval met een groot aandeel zwavelzuur. Er hoeft niet gewacht te worden totdat het mestfermentatiesysteem is uit ontwikkeld. Op termijn zal door de kennisontwikkeling van de mestfermentatie naar verwachting steeds minder aan hulpstoffen (zwavelzuur, azijnzuur of een goedkope C-bron) nodig zijn waardoor de bedrijfseconomische perspectieven verbeteren (hypothese).
- er beduidend minder zwavelzuur nodig zal zijn hetgeen gunstig is vanuit oogpunt van de zwaveltoevoer naar percelen, zowel qua gewaskwaliteit als uitspoeling van zwavel (sulfaat) naar het grondwater; en
- mest met een verhoogd gehalte aan acetaat mogelijk een gunstig effect heeft op de bodem.

Met de voorgestelde mix van de twee systemen kan waarschijnlijk een vrij korte doorlooptijd worden gerealiseerd naar een operationeel systeem voor de praktijk.

5.2 Onderzoeks- en kennisvragen

In paragraaf 3.8 en 4.3 zijn onderzoeksvragen en kennisvragen benoemd indien men met anorganisch of biologisch aanzuren verder wil. Het meest kansrijk achten we een mix van beide systemen zoals in de voorgaande paragraaf is aangegeven. Vanuit dat vertrekpunt kunnen de volgende integrale kennisvragen worden geformuleerd:

- wat is vanuit milieuhygiënisch en economisch perspectief nodig voor een optimale zuurproductie van micro-organismen in mest;
- hoe kan het systeem technisch optimaal worden ingericht, zodat deze flexibel kan omgaan met de mestsamenstelling en omstandigheden;
- wat is het effect van voermaatregelen op broeikasgas- en NH_3 -emissies en zuurverbruik, idealiter vanuit een integrale benadering zodat kan worden voorkomen dat aanpassingen resulteren in conflicterende resultaten voor de verschillende broeikasgassen en NH_3 ;
- wat is het effect van aanzuren op de microbiële activiteit in mest en afbraaksnelheid van de mest en het dien ten gevolge vrijkomen van voedingsstoffen, met name na toedienen aan de bodem; en
- het maken van een goede inschatting van het effect van biologisch aanzuren op de netto emissie van broeikasgassen (CH_4 , CO_2 en N_2O) en van eventuele andere componenten die als additief aan de mest worden toegevoegd.

5.3 Hoe kosten toe te rekenen

De ontwikkeling van de aanzuurtechniek is vooral tot stand gekomen vanuit oogpunt van vermindering van de ammoniakemissie. Voor het Infarmsysteem zijn kostencomputaties wat het systeem netto kost per koe, per kg vermindering ammoniakuitstoot of per kg vermindering van de methaanuitstoot. Voor de agrariër die dit systeem wil gaan toepassen is de basisvraag of deze kosten en de daarmee gemoeid gaan kosten terug te verdienen zijn doordat toepassing van het systeem bedrijfsvergroting beter mogelijk wordt.

De vraag is of beperking van de methaanuitstoot ook maatschappelijk gewaardeerd moet worden via een stimulerings- of subsidieregeling. Dit is een politieke vraag. Feit is wel dat het de toepassing van aanzuursystemen zal bespoedigen, nadat een aantal onderzoeksvragen zijn beantwoord.

5.4 Conclusies (en aanbevelingen)

- Mest aanzuren is perspectiefvol vanuit oogpunt van vermindering van en de ammoniakemissie en de

vermindering van de uitstoot van broeikasgassen.

- Een aanzuursysteem dat geheel gebaseerd is op biologisch aanzuren is voor de langere termijn het meest perspectiefvol. Voor de korte termijn kan waarschijnlijk het best worden ingezet op een mix van biologisch en anorganisch aanzuren, vanuit oogpunt van risicospreiding tussen de kosten voor inzet van hulpmiddelen (azijnzuur, C-bronnen en zwavelzuur).
- Technisch onderzoek naar het inrichten en optimaliseren van de procescondities voor biologisch aanzuren is nodig om de rentabiliteit en de milieubaten te optimaliseren, hetgeen bepalend is voor de implementatie kansen.
- Op (de langere termijn) kan men zich richten op systeemonderzoek om biologisch aanzuren verder door te ontwikkelen.

6 Referenties

- Aarts HFM, Hilhorst GJ, Sebek L, Smits MCJ & Oenema J (2007). De ammoniakemissie van de Nederlandse veehouderij bij een management gelijk aan dat van de deelnemers aan 'Koeien en Kansen', Wettelijke onderzoekstaken natuur en Milieu, Rapport 63, Wageningen.
- Anoniem (2011). Programmatische aanpak stikstof: PAS, toelichting voorlopig programma. Presentatie technische briefing Vaste commissie voor LNV van de Tweede Kamer 30-11-2010. Ministerie van Landbouw, Natuur en voedselkwaliteit.
- Bannink A, Sebek L & Dijkstra J (2009). Methaan te lijf door voer, Melkveebedrijven kunnen uitstoot beperken door aanpassen van het rantsoen. *Veeteelt* mei 2009 p. 10-12.
- Berg W, Turk M & Hellebrand HJ (2006). Effects of acidifying liquid cattle manure with nitric or lactic acid on gaseous emissions. Workshop on Agricultural Air Quality, Washington DC, USA June 5-8 2006 p. 492-498.
- Borst, GHA (2001). Acute zwavelwaterstof (H₂S)-vergiftiging ten gevolge van aanzuring van mengmest op een varkensbedrijf. *Tijdschrift voor Diergeneeskunde* 126: 104-105.
- Bussink DW, Huijsmans JFM & Ketelaars JJMH (1994). Ammonia volatilization from nitric-acid treated cattle slurry surface applied to grassland, *Netherlands Journal of Agricultural Science* 42: 293-309.
- Bussink DW, Den Boer DJ, Van Duinkerke G, Zom RLG (2007). Mineralenvoorziening rundvee via Voerspoor of Bodem- en Gewasspoor, NMI rapport 1139.
- Bussink DW (2009). Perspectives of the new Infarm slurry acidification system; consequences for nutrient management and ammonia emission, Nutrient management Instituut, Wageningen.
- Bussink DW & Oenema O (1998). Ammonia volatilization from dairy farming systems in temperate areas; A review. *Nutrient cycling in Agroecosystems* 51: 19-33.
- Clemens, J, Vandré R, Kaupenjohann M & Goldbach H (1997). Ammonia and nitrous oxide emissions after landspreading of slurry as influenced by application technique and dry matter-reduction. II. Short term nitrous oxide emissions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 160: 491-496.
- Clemens J, Bergmann S & Vandré R (2002). Reduced ammonia emissions from slurry after self-acidification with organic supplements. *Environmental Technology* 23: 429-435.
- Clemens J & Wulf S (2005). Reduktion der Ammoniakausgasung aus Kofermentationssubstraten und G lle während der Lagerung und Ausbringung durch interne Versaurung mit in NRW anfallenden organischen Kohlenstofffraktionen. *Forschungsbericht Nr. 121, Universität Bonn*.
- De Groot M & De Bruin S (2011). De programmatische aanpak stikstof (PAS): het laatste traject. *Tijdschrift lucht* 1.
- Duinkerken van G, Smits MCJ, Sebek LBJ, Vereijken PFG, André G & Monteny GJ (2004). Ammoniakemissie uit de melkveest l bij beperkte weidegang in relatie tot melkureumgehalte, *Praktijkrapport rundvee nummer 46, Animal Science Group Wageningen UR*.
- Duinkerken van G, André G, Smits MCJ, Monteny GJ, Blanken K, Wagemans MJM & Sebek LBJ (2003). Relatie tussen voeding en ammoniakemissie vanuit de melkveest l *Praktijkrapport rundvee nummer 25, Animal Science Group Wageningen UR*.
- EFMA (2000). Production of sulphuric acid. European Fertilizer Manufacturers' Association, Brussels pp. 64
- Fangueiro D, Ribeiro H, Coutinho J, Cardenas L, Trindade H, Cunha-Queda C, Vasconcelos E & Cabral F (2010a). Nitrogen mineralization and CO₂ and N₂O emissions in a sandy soil amended with original or acidified pig slurries or with the relative fractions. *Biol. Fert. Soils* 46: 383-391.
- Fangueiro D, Gusmao M, Surgu S & Cabral F (2010b). Assessment of CO₂ emissions during acidification, storage, and after incorporation to soil of pig slurry. *Environment, nutrient losses, impact of storage and spreading operations*.
- Hendriks JGL & Vrielink MGM (1996). Microbieel aanzuren van vleesvarkenmest. *Praktijkonderzoek*

- varkenshouderij proefverslag P1.150 ISSN 0992-8586.
- Hoogeveen MW, Luessink HH & Blokland PW (2010). Ammoniakemissie uit de landbouw in 2020, Rapport 2010-080, LEI, Den Haag.
- Hölscher R (2005). Nachrüstlösungen zur Emissionsminderung dezentral entlüfteter Stallungen zur Schweinemast. Dissertation Universität Bonn.
- Huijsmans JFM & Vermeulen GD (2008). Ammoniakemissie bij het toedienen van dierlijke mest. Actualisatie emissiefactoren. PRI rapport 218, Plant Research International, Wageningen.
- Husted S, Jensen LS & Jørgensen SS (1991). Reducing ammonia loss from cattle slurry by the use of acidifying additives: the role of the buffer system, *J. Sci. Food Agric.* 57: 335-349.
- Janssens J (2004). Emissiearme stal mag flinke duit kosten, *Varkenshouderij, tweewekelijkssupplement van boerederij* 89 (5): 10-11
- Kai P, Pederson P, Jensen JE, Hansen MN & Sommer SG (2008). A whole-farm assessment of the efficacy of slurry acidification in reducing ammonia emissions, *European Journal of Agronomy* 28: 148-154.
- Kirchmann H & Lundvall A (1992). Relationship between N immobilization and volatile fatty acids in soil after application of pig and cattle slurry, *Biology and fertility of soils* 15: 161-164.
- Kuikman PJ, Van der Hoek KW, Smit A & Zwart K (2006). Update of emission factors for nitrous oxide from agricultural soils on the basis of measurements in the Netherlands. Alterra report 1217.
- Küsel K, Wagner C & Drake HL (1999). Enumeration and metabolic product profiles of the anaerobic microflora in the mineral soil and litter of a beech forest. *FEMS Microbiology Ecology* 29: 91-103.
- Laughlin RJ, Rütting T, Müller C, Watson CJ & Stevens RJ (2009). Effect of acetate on soil respiration, N₂O emissions and gross N transformations related to fungi and bacteria in a grassland soil. *Applied Soil Ecology* 42: 25-30.
- Lesschen JP, Kuikman PJ, Bannink A, Monteny GJ, Sebek L & Velthof GL (2008). Klimaatmaatregelen in de agrosectoren en de afwentelingseffecten, Alterra, Wageningen.
- Maas CWM, Coenen PWHG, Zijleman PJ, Baas K, van den Berghe G, van den Born GJ, Brandt AT, Guis G, Geilenkirchen G, te Molder R, Nijdam DS, Peek CJ & van der Sluis SM (2010). Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990-2008. Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), Bilthoven, PBL report 500080017 / 2010.
- McCrary DF & Hobbs PJ (2001). Additives to reduce ammonia and odor emissions from livestock wastes: A review. *J. Environ Qual.* 30: 345-355.
- Oenema O & Velthof GL (1993). Denitrification in nitric-acid-treated cattle slurry during storage. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 41: 63 – 80.
- Ottosen LDM, Poulsen HV, Nielsen DA, Finster K, Nielsen LP & Revsbech NP (2009). Observations on microbial activity in acidified pig slurry. *Biosystems engineering* 102: 291-297.
- Pain BF, Thompson RB, Rees YJ & Skinner JH (1990). Reducing gaseous losses of Nitrogen from cattle slurry applied top grassland by the use of additives, *J. Sci. Food Agric.* 50: 141-153.
- Pötter M, Oppermann-Sanio FB & Steinbüchel A (2001). Cultivation of Bacteria Producing Polyamino Acids with Liquid Manure as Carbon and Nitrogen Source. *Appl. Environm. Microbiol.* 67:617-622
- Sebek (2010) Handreiking bedrijfsspecifieke excretie melkvee 2010.
- Silvis HJ, Bont CJAM, Helming JFM, Van Leeuwen MGA, Bunte F & Van Meijl JCM (2009). De agrarische sector in Nederland naar 2020: perspectieven en onzekerheden. Rapport 1904278 LEI Wageningen UR, Den Haag.
- Somitsch W, Wenzl W, Pilch Ch & Gilhofer A (2008). Behandlung von Gülle mit bioaktiven Additiven in einem Flachbett-Bioreaktor. Abschlussbericht des Forschungsprojektes Nr: 100333/4
- Sommer SG & Husted S (1995). The chemical buffer system in raw and digested animal slurry. *J. Agric. Sci. Camb.* 124: 45-53

- Sommer SG & Hutchings NJ (2001). Ammonia emissions from field applied manure and its reduction-invited paper, *European Journal of Agronomy* 15: 1-15.
- Sommer SG, Schjoerring JK & Denmead OT (2004). Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops. *Advances in Agronomy* 82: 557-622.
- Sørensen P & Eriksen J (2009). Effects of slurry acidification with sulphuric acid combined with aeration on the turnover and plant availability of nitrogen, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 131: 240-246
- Stevens RJ, Laughlin RJ & Frost JP (1989). Effect of acidification with sulphuric acid on the volatilization of ammonia from cow and pig slurries. *The Journal of Agricultural science* 113: 389-395
- Stevens RJ, Laughlin RJ, O'Brien CJ, Carton OT & Lenehan JJ (1997). The efficiency of the nitrogen in cattle slurry acidified with nitric acid for grass production, *Journal of Agricultural Science* 129: 335-342.
- Tamminga S, Bannink A, Dijkstra J & Zom R (2007). Feeding strategies to reduce methane loss in cattle. Report 34, Animal Science Group Wageningen UR
- Lameijer E F (Smilde NI) & Vervort K (Aalden NI), Eu patent 0 612 704 B1, gepubliceerd 30-8 1995.
- Vandré R & Clemens J (1996). Studies on the relationship between slurry pH, volatilisation processes and the influence of acidifying additives. *Nutr. Cycl. Agroecosys* 47: 157-165.
- Van der Hoek KW, Van Schijndel MW & Kuikman PJ (2007). Direct and indirect nitrous oxide emissions from Agricultural soils, 1990-2003. RIVM report 680125003/2007 and MNP report 500080003/2007. Netherlands Environmental Agency (MNP) and Alterra.
- Van Dongen CFJ, Bruinenberg MH & Den Boer DJ (2006). De pH van faeces en urine en de effecten daarvan op ammoniakemissie. Rapport 737.04 Nutriënten management instituut, Wageningen.
- Van Dooren HJC & Smits MCJ (2007). Reductieopties voor ammoniak- en methaanemissie uit huisvesting voor melkvee. Rapport 80 Animal science Group Wageningen UR.
- Van Groenigen JW, Velthof GL, Oenema O, Van Groenigen KJ, Van Kessel C (2010). Towards an agronomic assessment of N₂O emissions: a case study for arable crops. *European Journal of Soil Science* 61 (6) pp. 903-913.
- Van Laar H & Van Straalen WM (2004). Ontwikkeling van een rantsoen voor melkvee dat de methaanproductie reduceert. Proefverslag nr BET-2004-24, Schothorst Feed Research, Lelystad.
- Van Lent AJH, (1993) Lagere nitraatverliezen bij aanzuren van mest tot pH 4, *Praktijkonderzoek* 93-6: 25-28.
- Van Vuuren D, Berk M, Farla J & De Vos R (2006). Van klimaatdoel naar emissie reductie. MNP publicatie 500114001/2006 Milieu- en Natuurplanbureau, Bilthoven.
- Velthof GL, De Haan MH, Schils RLM, Monteny GJ, Van den Polvan Dasselaar A, Kuikman PJ (2000) Beperking van lachgasemissie uit bemeste landbouwgronden, een systeemanalyse, Alterra-rapport 114-2
- Velthof GL, Nelemans JA, Oenema O & Kuikman PJ (2005). Gaseous nitrogen and carbon losses from pig manure derived from different diets. *J. Environm. Qual.* 34: 698-706
- Velthof GL, Van Bruggen C, Groenestein CM, de Haan BJ, Hoogeveen MW & Huijsmans JFM (2009). Methodiek voor berekening van ammoniakemissie uit de landbouw in Nederland, Wettelijke onderzoekstaken natuur en Milieu, Rapport 70, Wageningen
- Wenzl W, Somitsch W & Gilhofer A (2009). Behandlung von Gülle mit bioaktiven Additiven in einem Flachbettreaktor. In „Landwirtschaft – Grundlage der Ernährungssicherung: regional oder global?“ ALVA Jahrestagung 2009, Salzburg. pp. 119-121
- Weiß S, Tauber M, Somitsch W, Meincke R, Müller H, Berg G & Guebitz GM (2010). Enhancement of biogas production by addition of hemicellulolytic bacteria immobilised on activated zeolite. *Water Research* 44: 1970-1980
- Wood S & Cowie A (2004). Review of Greenhouse Gas Emission Factors for Fertiliser Production. IEA Bioenergy Task 38. pp 20 (internet publication).

Appendix 1. NH₃ emissies (kg N dier⁻¹ jr⁻¹) op basis van de Regeling ammoniak en veehouderij, gepubliceerd in Staatscourant 2435 februari 2011 voor de diercategorie melk- en kalfkoeien ouder dan 2 jaar.

Staltype	Vloer en andere specificaties	Emissie (kg N dier ⁻¹ jr ⁻¹)	
		Beweiden	Permanent opstallen
Loopstal	hellende vloer en giergoot of met roostervloer; beide met spoelsysteem	6,2	7,1
Loopstal	hellende vloer en giergoot; max. 3 m2 mestbesmeurd oppervlak per koe	6,2	7,1
Loopstal	hellende vloer en spoelsysteem; max. 3,75 m2 mestbesmeurd oppervlak per koe	5,6	6,4
Loopstal	sleufvloer en mestschuif	6,3	7,6
Ligboxen	dichte hellende vloer, met profilering, met snelle gierafvoer met mestschuif	6,2	7,1
Ligboxen	dichte hellende vloer, met rubbertoplaag, met snelle gierafvoer met mestschuif	6,2	7,1
Ligboxen	sleufvloer met noppen en mestschuif	6,3	7,6
Ligboxen	roostervloer voorzien van een bolle rubber toplaag en afdichtflappen in de roosterspleten	3,4	3,9
Ligboxen	roostervloer voorzien van een bolle rubber toplaag	5,4	6,1
Ligboxen	geprofileerde vlakke vloer met hellende gleuven, regelmatige mest afstorten en hoog frequente mestverwijdering met een vingerschuif	6,7	7,6
Ligboxen	geprofileerde vlakke vloer met hellende gleuven, regelmatige mest afstorten en frequent schuiven	6,8	7,8
Ligboxen	roostervloer voorzien van cassettes in de roosterspleten	5,8	6,7
Ligboxen	geprofileerde vlakke vloer met hellende gleuven, regelmatige mestafstorten voorzien van afdichtflappen, frequent schuiven en dakisolatie	5,8	6,7
Ligboxen	geprofileerde vlakke vloer met hellende gleuven, regelmatige mestafstorten voorzien van afdichtflappen en frequente mestverwijdering met een vingerschuif	5,8	6,6
Overige huisvestingssystemen		7,8	9,1

Appendix 2. Mest aanzuren met base-neerslaande zouten

Het toevoegen van een (an)organisch zuur is gebaseerd op het direct verlagen van de pH van mest om zo de omzetting van NH_4^+ in NH_3 stil te leggen (vergelijking 1). Het gebruik van base-neerslaande zouten is gebaseerd op het tegen gaan van het vervluchtigen van CO_2 . Bij het vervluchtigen van NH_3 daalt de pH van mest (vergelijking 1). Bij het vervluchtigen van CO_2 stijgt de pH volgens vergelijking 4 en 5:



De pH stijgt omdat bij de emissie van CO_2 protonen ($\text{H}_3\text{O}^+ = \text{H}^+$) verdwijnen. Het toevoegen van CaCl_2 heeft, in tegenstelling tot het toevoegen van een (an)organisch zuur, geen effect op de initiële pH van de mest maar zorgt er voor dat de pH van de mest niet stijgt door CO_2 vervluchtiging tegen te gaan (Vandré & Clemens, 1996).

Met het gebruik van base-neerslaande zouten kan de NH_3 -emissie met 50% worden verlaagd (incubatie experimenten Vandré & Clemens, 1996). Indien de hoeveelheid CaCl_2 wordt afgestemd op de totale alkaliniteit van de mest kan zelfs een reductie potentieel van 85% worden bereikt (Husted et al., 1991). In een microplot veldexperiment werd bevestigd dat het toevoegen van CaCl_2 , NH_3 -emissies reduceert en conserverend werkt op het N-gehalte van de mest (Vandré & Clemens, 1996).

Vandré & Clemens (1996) vonden dat CaCl_2 het meest effectieve zout met de minste nadelen was in vergelijking met K-zouten en Ca-zouten met SO_4^{2-} en NO_3^- . CaCl_2 is echter wel minder effectief dan sterk zuur in het verlagen van de pH en het reduceren van de NH_3 -emissie (Husted et al., 1991). Een stabiele lage pH op de langere termijn kan met base-neerslaande zouten niet worden bereikt (Husted et al., 1991). De pH daling wordt gelimiteerd door het evenwicht met CaCO_3 . Om de pH te stabiliseren zou frequent extra zout moeten worden toegevoegd waardoor ook relatief veel zout nodig is (McCrory & Hobbs, 2001). Het voordeel van het gebruik van base-neerslaande zouten is dat de additieven goedkoop en het gebruik geen risico's met zich meebrengt. Op basis hiervan stellen McCrory & Hobbs (2001) dat base-neerslaande zouten vooral toepasbaar zijn om NH_3 -emissies tijdelijk te reduceren. Het effect op broeikasgasemissies is zover bekend nooit onderzocht.