

Wageningen UR Livestock Research

Partner in livestock innovations



Rapport 248

Emissies van broeikasgassen, ammoniak, fijn stof en geur in de mestketen

Januari 2010



LIVESTOCK RESEARCH
WAGENINGEN UR

Colofon

Uitgever

Wageningen UR Livestock Research
Postbus 65, 8200 AB Lelystad
Telefoon 0320 - 238238
Fax 0320 - 238050
E-mail info.livestockresearch@wur.nl
Internet <http://www.livestockresearch.wur.nl>

Redactie

Communication Services

Copyright

© Wageningen UR Livestock Research, 2009
Overname van de inhoud is toegestaan,
mits met duidelijke bronvermelding.

Aansprakelijkheid

Wageningen UR Livestock Research (formeel ASG Veehouderij BV) aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Wageningen UR Livestock Research, formeel 'ASG Veehouderij BV', vormt samen met het Centraal Veterinair Instituut en het Departement Dierwetenschappen van Wageningen Universiteit de Animal Sciences Group van Wageningen UR.

Losse nummers zijn te verkrijgen via de website.



De certificering volgens ISO 9001 door DNV onderstreept ons kwaliteitsniveau. Op al onze onderzoeksopdrachten zijn de Algemene Voorwaarden van de Animal Sciences Group van toepassing. Deze zijn gedeponeerd bij de Arrondissementsrechtbank Zwolle.

Abstract

In the manure chain, emissions of greenhouse gases, ammonia, particulate matter and odour occur. This report describes the sources and the underlying processes, and analyses mitigation measures in an integrated approach.

Keywords

Greenhouse gases, nitrous oxide, methane, ammonia, particulate matter, odour, animal husbandry, manure, integrated analysis

Referaat

ISSN 1570 - 8616

Auteurs

C.M. Groenestein (Livestock Research)
J.F.M. Huijsmans (PRI)
R.L.M. Schils (Alterra)

Titel

Emissies van broeikasgassen, ammoniak, fijn stof en geur in de mestketen
Rapport 248

Samenvatting

In de mestketen, van staldeur tot en met mesttoediening, treden emissies op van broeikasgassen, ammoniak, fijnstof en geur. Dit rapport beschrijft de bronnen en de onderliggende processen, en analyseert reductiemaatregelen, in een integrale manier.

Trefwoorden

Broeikasgassen, lachgas, methaan, ammoniak, fijnstof, geur, mest, veehouderij, integrale analyse



LIVESTOCK RESEARCH
WAGENINGEN UR

Rapport 248

Emissies van broeikasgassen, ammoniak, fijn stof en geur in de mestketen

C.M. Groenestein (Livestock Research)

J.F.M. Huijsmans (PRI)

R.L.M. Schils (Alterra)

Januari 2010

Samenvatting

Over de onderlinge afhankelijkheid en de interactie van de verschillende emissies van NH_3 , CH_4 , N_2O , geur en van fijn stof in de mestketen is weinig bekend evenals over het risico van afwenteling van emissiereducerende maatregelen op de andere emissies. Een deskstudie is uitgevoerd naar emissies in de mestketen met de doelstelling te inventariseren welke inspanningen nodig zijn om de relaties in de keten beter in kaart te brengen en te inventariseren waar mogelijkheden liggen tot optimalisatie van de keten op het gebied van emissiereducties, rekening houdend met het risico van afwenteling. De mestketen betreft de emissies in de huisvesting, buitenopslag, bij het toedienen van mest en bij weidegang. De keten loopt van voer, via het dier naar de productie en toediening van mest, met andere woorden: 'van staldeur tot en met mesttoediening'. Daarnaast is ook de CO_2 -emissie tijdens mesttransport meegenomen. Bij deze inventarisatie is uitgegaan van nationaal en internationaal beschikbare kennis.

Gasvormige stikstofverliezen (ammoniak en lachgas) treden op in de mestcomponent van de keten: in huisvesting en opslag, bij beweiding en bij toediening. Methaanverliezen treden vooral op bij de diercomponent, via pensfermentatie, en bij de mestcomponent, via huisvesting en opslag. Geur komt vrij uit huisvesting en bij de toediening van mest. Emissies van fijnstof komen in alle componenten van de mestketen voor, van voer, via dier tot mest. Er is weinig kennis over emissies van geur en fijnstof bij toedienen en beweiden. Zeker de emissie van geur zal naar verwachting niet verwaarloosbaar zijn. Bij het toedienen van gedroogde mest is het risico van fijnstofemissie niet te verwaarlozen. De bijdrage van mesttransport aan de broeikasgasemissies uit de landbouw is zeer gering.

De processen die ten grondslag liggen aan de emissie van een bepaalde component zijn als uitgangspunt genomen. Aan de hand hiervan is voor de ketenonderdelen voer, dier en mest (met onderverdeling naar huisvesting, opslag, toediening en weide) de relevantie aangegeven voor de verschillende emissies. Daarbij is gekeken naar dierfactoren, mesteigenschappen, omgevingsfactoren en bodem- en gewasfactoren. Hieruit bleek dat maatregelen die betrekking hebben op respectievelijk mestsamenstelling, mestoppervlak en omgevingsfactoren de meest integrale oplossingen bieden om meerdere emissies in meerdere ketenonderdelen te reduceren. Alleen maatregelen m.b.t. de mestsamenstelling kunnen effectief zijn verderop in de keten. Deze aspecten zijn vervolgens beoordeeld voor verschillende maatregelen bij de opslag van mest (binnen en buiten), het toedienen en beweiden.

Vaste mest is in principe alles wat niet drijfmest is, en in die zin zeer divers van samenstelling. Omdat behalve anaerobe omstandigheden, ook aerobe omstandigheden kunnen optreden in vaste mest zijn meerdere microbiologische processen van invloed op de vorming en de emissie van gasvormige componenten, vooral van de broeikasgassen. Hierdoor zijn effecten van maatregelen moeilijker in te schatten dan bij drijfmest. Daarbij geldt dat van vaste mest veel minder onderzoeksgegevens beschikbaar zijn dan van drijfmest.

In een integrale benadering zijn de effecten van maatregelen veelal wel kwalitatief, maar niet kwantitatief in te schatten, vooral als het om maatregelen gaat die niet expliciet op de betreffende emissie gericht is. Dit geldt voor emissies uit drijfmest en voor emissies uit vaste mest. Om kwantitatieve inschattingen te doen van integrale effecten van maatregelen is een modelbenadering nodig. Er zijn diverse modellen ontwikkeld, welke op bruikbaarheid zijn getoetst.

Aanbevelingen

- In onderhavige studie is mestbenutting door gewasgroei niet opgenomen. De lachgasverliezen die hierbij optreden zijn eveneens niet belicht. Het verdient aanbeveling dit wel mee te nemen in de ketenbenadering.
- Er is meer onderzoek nodig naar het effect van toedienen op de emissie van fijnstof en geur.
- Om integraal emissies te reduceren zijn combinaties van maatregelen nodig, zowel binnen ketenonderdelen als tussen ketenonderdelen. Waakzaamheid op kruisgevoeligheden is gewenst.

- Om kwantitatieve inschattingen te doen van integrale effecten van maatregelen is een modelbenadering nodig. Er zijn diverse modellen ontwikkeld, een eerste aanzet zou zijn deze op bruikbaarheid te toetsen, om vervolgens daarop door te gaan om een integraal model te ontwikkelen.
- Met een integraal model dienen scenariostudies verricht te worden om inzicht te geven in effectiviteit van maatregelen in de hele keten. Tevens leveren de modellen op deze manier duidelijke prioriteiten bij het vullen van kennislacunes.
- Om meer inzicht te krijgen in de emissiefactoren van vaste mest is meer onderzoek nodig, met nadruk op de kwantitatieve aspecten.
- Ontwikkelingen in de veehouderij dienen tegen het “emissie-licht”gehouden te worden.

Summary

The relationships and interactions between emissions of ammonia, methane, nitrous oxide, odour and particulate matter in the manure chain are relatively unknown. This also applies to the risk of negative trade-offs of mitigation measures. A desk study was carried out into these emissions, in order to identify the required actions to improve our knowledge of the interactions, and to identify the possibilities to improve the manure chain towards lower emissions, taking into account potential trade-offs. The manure chain includes housing, storage, application and grazing excrements, and runs from feed, through the animal to excretion and application, in other words: 'from stable door to field-application'. Furthermore the study includes carbon dioxide emissions from manure transport. The study is based on national and international knowledge.

Gaseous nitrogen losses occur in the manure component: in housing and storage, during grazing and application. Methane losses mainly occur in the animal component, through enteric fermentation, and in the manure component, through housing and storage. Odour is emitted from housing and during manure application. Emissions of particulate matter occur in all components of the manure chain, from feed and animals to feed.

Little is known on emissions of odour and particulate matter during manure application and during grazing. Especially the emission of odour is expected to be important. Furthermore the application of solid manures is associated with emissions of particulate matter. The contribution of manure transport to the emission of carbon dioxide is relatively small.

The underlying processes were analysed with respect to animal related factors, manure characteristics, environmental factors, and soil and crop factors. It was concluded that those factors related to manure composition, manure surface and environment offered the most integral solutions to reduce a broad range of emissions. Only measures concerning manure composition showed an effect downstream.

In solid manure, both aerobic and anaerobic conditions can occur, increasing the risk of higher emissions, particularly those of greenhouse gases. Therefore it is more difficult to assess the effects of measures with solid manure than with liquid manure. Furthermore, there are fewer studies on solid manure than on liquid manures (or slurries).

In an integrated approach, the effects could only be assessed qualitatively, especially if the measures were not intended for the specific emissions. For a quantitative assessment, it is necessary to use a model approach. Several models are developed, which were assessed in this study.

Recommendations

- This study did not include manure utilisation by crops. The related nitrous oxide emissions were not included. It is recommended to include these losses in further integrated studies.
- Further research is needed into the effects of manure application on odour and particulate matter emissions.
- For integrated emission reductions, combinations of measures are necessary. This requires careful assessment of trade-offs.
- A model approach is necessary for a quantitative assessment of mitigation measures. These models can be used to analyse scenarios. Furthermore, the models can pinpoint knowledge gaps.
- Further research is needed on emission factors of solid manure.
- Future developments in animal husbandry have to assess on their potential emissions.

Inhoudsopgave

Samenvatting

Summary

1	Inleiding	1
2	De mestketen	2
2.1	Afbakening van de mestketen	2
2.2	Emissies in de mestketen	3
2.3	CO ₂ -emissie door mesttransport	5
3	Emissiebepalende factoren	7
3.1	Dierfactoren	7
3.1.1	Diercategorie en massa van de dieren	7
3.1.2	Voersamenstelling	8
3.2	Mesteigenschappen	9
3.2.1	Mestsamenstelling	9
3.2.2	Mestoppervlakte	11
3.2.3	Mesthoeveelheid	12
3.2.4	Leeftijd van de mest	12
3.2.5	Mesttemperatuur	12
3.3	Omgevingsfactoren	13
3.4	Bodemfactoren	14
3.4.1	Grondsoort	14
3.4.2	Grondwaterstand, bodemvocht en bodemstructuur	15
3.4.3	Gewas	16
4	Integrale emissiereductie-maatregelen	17
4.1	Toelichting maatregelen	18
4.1.1	Maatregelen mestsamenstelling	18
4.1.2	Maatregelen mestoppervlakte	19
4.1.3	Maatregelen omgevingsfactoren	20
4.1.4	Maatregelen overig	20
5	Modelmatige benadering	21
5.1	Beschikbare modellen	21
6	Conclusies	23
7	Aanbevelingen	24
	Literatuur	25

1 Inleiding

In opdracht van het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit is in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoek een deskstudie uitgevoerd naar emissies in de mestketen. Het betreft de gasvormige emissie van ammoniak (NH_3), methaan (CH_4), lachgas (N_2O), fijnstof (PM) en geur tijdens huisvesting, buitenopslag en toedienen van mest, en de emissie van koolstofdioxide (CO_2) tijdens mesttransport. Er is weinig informatie over de onderlinge afhankelijkheid en de interactie met de verschillende onderdelen van de mestketen. In het bijzonder is kennis gewenst over het risico van afwenteling van reducerende maatregelen op de andere emissies. De doelstelling van voorliggende studie is

1. de mestketen met nationaal en internationale beschikbare kennis van de emissies in beeld te brengen (kennisvraag 1),
2. te inventariseren welke inspanningen nodig zijn om de relaties in de keten beter in kaart te brengen (kennisvraag 2) en
3. te inventariseren waar mogelijkheden liggen tot optimalisatie van de keten op het gebied van emissiereducties rekening houdend met het risico van afwenteling (kennisvraag 3).

Dit rapport is een opmaat voor deze inventarisaties.

Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de mestketen en de emissies zoals die in deze studie zijn afgebakend.

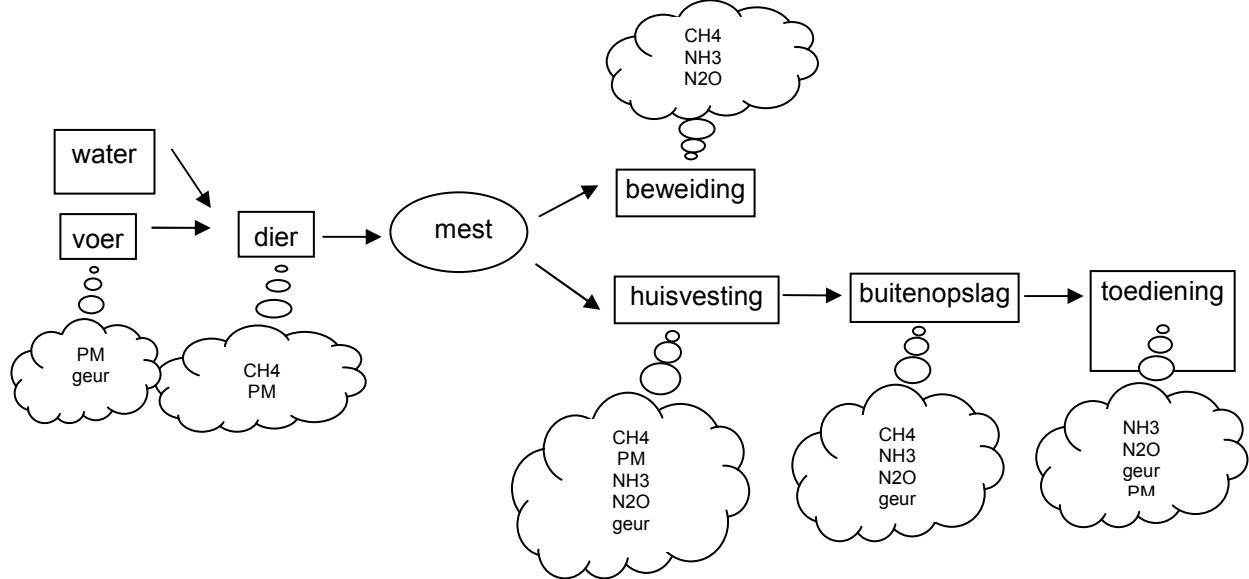
Hoofdstuk 3 gaat in op de factoren die belangrijk zijn bij het ontstaan en het vervluchtigen van de gasvormige componenten. Hoofdstuk 4 beschrijft vervolgens wat de effecten zijn van

emissiereducerende technieken op de emissies. Hoofdstuk 5 loopt vooruit op het beter in kaart brengen van de afhankelijkheden van de emissies en de interacties van de verschillende onderdelen in de mestketen door te inventariseren welke modellen beschikbaar zijn die emissies in de keten beschrijven. Hiermee zijn de kennisvragen 1 en 2 beantwoord. Hoofdstuk 6 gaat tenslotte in op de conclusies en er worden aanbevelingen gedaan om de kennis te vergroten zodat optimalisatie van de keten op het gebied van de emissies gevonden kan worden (beantwoording van kennisvraag 3).

2 De mestketen

2.1 Afbakening van de mestketen

De integrale beoordeling van efficiënt gebruik van nutriënten gebeurt meestal aan de hand van kringlopen waarin de stofstromen zijn weergegeven tussen de componenten voer, dier, mest bodem en gewas. Nutriënten doorlopen deze kringloop van aanvoer tot afvoer, waarbij diverse verliezen op kunnen treden. Voor deze studie beschouwen we een specifiek deel van de kringloop, namelijk de mestketen. De keuze voor de systeemgrenzen is afhankelijk van de vraagstelling, en is van groot belang voor de resultaten. De afbakening van de mestketen in deze studie is in overleg met de opdrachtgever tot stand gekomen. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd. De keten loopt van voer, via het dier naar de productie en toediening van mest, met andere woorden: 'van staldeur tot en met mesttoediening'. Figuur 1 brengt de afbakening van de keten schematisch in beeld.



Figuur 1 Schematisch overzicht van de afgebakende mestketen en de emissies van de verschillende ketenonderdelen, ammoniak (NH₃), methaan (CH₄), lachgas (N₂O), fijnstof (PM) en geur

We beschouwen gemiddelde Nederlandse gangbare veehouderijssystemen, met gezonde dieren, die voldoen aan de wettelijke huisvestingseisen. De bedrijven houden de dieren dus volgens de regels in de welzijnswet en behandelen de mest volgens de regels die direct of indirect voortvloeien uit de Meststoffen gebruiksvoorschriften en regelgevingen, beschikken over een afgedekte mestopslag en dienen de mest op een emissiearme wijze toe. De geproduceerde mest wordt niet bewerkt. We beschouwen directe emissies van NH₃, CH₄, N₂O, fijnstof en geur. De emissie van CO₂ tijdens mesttransport wordt expliciet meegenomen. Deze studie beperkt zich tot gasvormige emissies en fijnstof en heeft dus alleen betrekking op het milieucompartiment lucht. Verliezen naar bodem en water worden niet meegenomen.

Hieruit volgt dat we niet in beschouwing nemen:

- Emissies bij de productie, transport en opslag van voer;
- De stikstofbenutting van het gewas inclusief de toegediende kunstmest¹;
- Stikstofverliezen door nitraatuitspoeling;
- Emissies door energieverbruik, anders dan voor mesttransport;
- Emissies die samenhangen met de verwerking van producten;
- Indirecte lachgasemissies als gevolg van nitraatuitspoeling en ammoniakemissie;

¹ Het gebruik van kunstmest vormt een belangrijk onderdeel van de totale stikstofkringloop op grondgebonden veehouderijbedrijven. Deze emissies worden in de analyse (hoofdstuk 3) weliswaar niet meegenomen, maar worden vanwege het belang wel bij de beschrijving van de maatregelen (hoofdstuk 4) meegenomen.

- Emissies door overpompen van mest van binnenopslag naar mesttankwagens en/of tijdelijke opslag;
- Overige gasvormige stikstofverliezen (N₂, NO en NO₂)

De bovenstaande uitgangspunten en afbakeningen zijn verder uitgewerkt in figuur 1. Hierin zijn de drie hoofdcomponenten voer, dier en mest te onderscheiden. De mestcomponent is verder onderverdeeld in uitscheiding in de weide (beweiding) en uitscheiding in de stal, tijdens buitenopslag en na toediening. Voor de voercomponent worden de emissies van fijnstof en geur vanuit de stal beschreven. Uit kuilvoer kan NH₃ emitteren, maar dit wordt gedefinieerd als voerproductie en -opslag en valt derhalve buiten de afbakening. Voor de diercomponent zijn de emissies van fijnstof en methaan relevant. De mestcomponent omvat de emissies van ammoniak, lachgas, geur, methaan en fijnstof. De emissies van ammoniak en lachgas zijn relevant voor alle vier de subcomponenten van mest (weide, huisvesting, opslag en toediening). Methaanemissies vinden plaats in de subcomponenten huisvesting, buitenopslag en in zeer geringe mate tijdens beweiding. Fijnstof is relevant voor huisvesting, en zou een rol kunnen spelen bij het toedienen van mest. Geuremissie speelt een rol bij huisvesting, opslag en mesttoediening.

2.2 Emissies in de mestketen

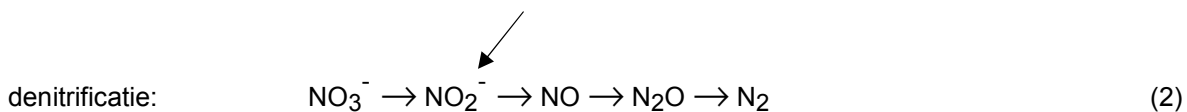
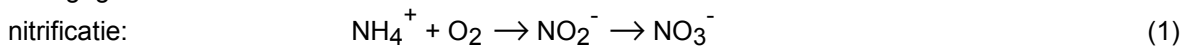
Emissies in de mestketen, binnen de afbakening in hoofdstuk 2.1 beschreven, betreffen NH₃, N₂O, CH₄, geur, fijnstof en CO₂ door mesttransport.

NH₃

Ammoniak werkt verzurend en eutrofiërend op het milieu en vervluchtigt uit het mengsel van faeces en urine (mest) nadat deze het lichaam van het dier verlaten heeft. Zo'n 90% van de ammoniakemissie in Nederland komt uit de landbouw. Ammoniak wordt vooral gevormd uit de urine-N en in mindere mate uit het organisch gebonden N in de faeces als deze omgezet wordt in ammonium (NH₄⁺) (mineralisatie). De NH₄⁺ in de vloeistoffase van de mest kan vervluchtigen in de vorm van NH₃. Een gedetailleerde beschrijving van de processen die bij de vorming van NH₃ een rol spelen wordt gegeven door Groot Koerkamp (1994), Bussink (1996), Aarnink (1997) en Monteny (2000).

N₂O

Lachgas (N₂O) werkt als een broeikasgas (ruim 300 maal zoveel als CO₂) en tast de ozonlaag aan. Net als bij NH₃ is de bron de mest. N₂O bepaalt 8% van de broeikasgasemissie in Nederland en 56% daarvan komt uit de landbouw als gevolg van mestmanagement en de toediening van mest (Bouwman, 1996, Bouwman et al., 2002, Maas et al., 2008). N₂O kan gevormd worden uit NH₄⁺ door de microbiële processen nitrificatie en denitrificatie. Nitrificatie zet NH₄⁺ om in NO₃⁻, denitrificatie zet vervolgens de NO₃⁻ weer om in N₂. Deze processen worden in vereenvoudigde vorm als volgt weergegeven:



Figuur 2 Schematische weergave van de microbiële processen nitrificatie en denitrificatie (Firestone et al., 1980)

Voor de eerste stap, de nitrificatie, is zuurstof nodig; voor de denitrificatie moet de omgeving zuurstofarm zijn. Wanneer de omstandigheden suboptimaal zijn zullen de processen niet compleet kunnen verlopen en kunnen de vluchtige tussenproducten N₂O en NO ontstaan en emitteren. Dit zijn tussenproducten van denitrificatie, maar kunnen via het gemeenschappelijke tussenproduct NO₂⁻ ook ontstaan als door een te lage zuurstofdruk de nitrificatie niet volledig kan verlopen (Groenestein & van Faassen, 1996). Voor een optimale situatie is behalve een optimale zuurstofvoorziening ook voldoende koolstof (C) nodig als energiebron voor de microben. Wanneer C en/of zuurstof niet aanwezig zijn zal de nitrificatie niet verlopen en kan derhalve ook geen denitrificatie optreden. In vergelijking met bodememissies is nitrificatie en denitrificatie bij drijfmest in opslag verwaarloosbaar: hier is een tekort aan C onder anaerobe omstandigheden. De C is echter wel aanwezig in stro of

strooisel. In stro- of strooiselmest kunnen deze microbiële processen dus op gang komen wanneer daarbij zuurstof beschikbaar is.

CH₄

Methaan is evenals N₂O een broeikasgas (ruim 20 maal sterker dan CO₂) en wordt gevormd uit organische stof door methanogene bacteriën. Methaan bepaalt 8% van de Nederlandse broeikasgasemissies, 54% daarvan komt uit de landbouw (Maas et al., 2008). Het ontstaat net als NH₃ en N₂O uit mest, maar het ontstaat ook in het dier zelf (endogene CH₄-productie). Bij eenmagige dieren wordt het gevormd door fermentatie in de dikke darm. Deze komt vrij door flatulatie. Bij herkauwers zitten er methanogene bacteriën in de pens. Deze methaan komt vrij via de bek door oprisping. De hoeveelheid endogene methaan die geproduceerd wordt is afhankelijk van de diersoort en de rantsoensamenstelling. Globaal kan gesteld worden dat een dier meer endogene methaan produceert wanneer het voer meer ruwe celstof bevat (Crutzen et al., 1986).

Methaan wordt ook gevormd uit de organische stof in de mest in opslag onder de stal (roosters) of buiten. Methanogene bacteriën functioneren onder anaerobe omstandigheden. In gedropte faeces tijdens beweiden kunnen anaerobe omstandigheden optreden waardoor CH₄ productie optreedt. Deze emissies zijn laag (Chadwick et al., 1997 & 2000). Tijdens toedienen zijn anaerobe zones in de mest verwaarloosbaar en derhalve ook de CH₄-emissie.

Geur

Geur kan in de leefomgeving hinder veroorzaken en brengt om die reden fysieke en psychische gezondheidsrisico's met zich mee. Geur wordt veroorzaakt door een scala aan chemische componenten. De belangrijkste die in de veehouderij zijn geïdentificeerd zijn afkomstig uit de mest en zijn vooral sulfiden, vluchtige vetzuren fenolen, indolen (Hobbs et al., 1998; Koziel et al., 2006; Le et al., 2005a). Begin jaren 90 van de vorige eeuw ervoer 23% van de Nederlandse bevolking geuroverlast van het verkeer en/of de industrie en 16% van de landbouw, in 2000 was dat respectievelijk 15 en 10% (CBS, 2003). Jong et al. (2000) stelden dat de twee belangrijkste oorzaken van geurbelasting uit de landbouw werden veroorzaakt door huisvesting en toediening van mest. De geuremissie van voer en die tijdens buitenopslag van mest worden daarom in het vervolg verwaarloosd.

Fijnstof

Fijnstof is stof dat voor het merendeel bestaat uit deeltjes met een aerodynamische diameter kleiner dan 10 µm. Dit stof wordt aangeduid als PM10. In het algemeen geldt hoe kleiner het stof, hoe schadelijker omdat het dieper in de longen kan doordringen. Daarom wordt behalve PM10 ook PM2,5 onderscheiden voor deeltjes met een diameter die kleiner zijn dan 2.5 µm. Dit zijn vooral de deeltjes die ontstaan door condensatie van verbrandingsproducten en door reactie van gasvormige luchtverontreiniging. Daarnaast kan fijnstof gevormd worden in de atmosfeer door o.a. NH₃, zogenaamd secundair fijnstof (Buijsman et al., 2005). In dit rapport wordt alleen ingegaan op de primaire fijnstofemissie. Inademing van fijnstof kan leiden tot gezondheidseffecten die kunnen leiden tot vroegtijdige sterfte. Bronnen van fijnstof in de veehouderij zijn vooral het voer, het dier (zoals huidschilfers en veren), de mest en het strooisel. Van de stofemissie door het landbouwbedrijf komt 95% uit de stallen. Stof door mestopslag buiten en het toedienen van dunne mest op het land worden in dit rapport daarom verwaarloosd. Wel wordt rekening gehouden met eventuele fijnstofemissie bij het uitrijden van gedroogde pluimveemest of andere vaste mest. Hier moet wel worden vermeld dat nog weinig onderzoek is verricht naar emissies van fijnstof bij toedienen. Van de Nederlandse primaire fijnstofemissie komt ca. 20% uit de landbouw. (Chardon en Van der Hoek, 2002)

In Tabel 1 is weergegeven welke ketenonderdelen van de mestketen een bijdrage leveren aan de verschillende emissies. CO₂-emissie door transport van mest is in deze tabel niet opgenomen. Dit wordt besproken in hoofdstuk 2.3.

Tabel 1 Emissies van de verschillende ketenonderdelen (nvt = niet van toepassing; * = potentiële emissie)

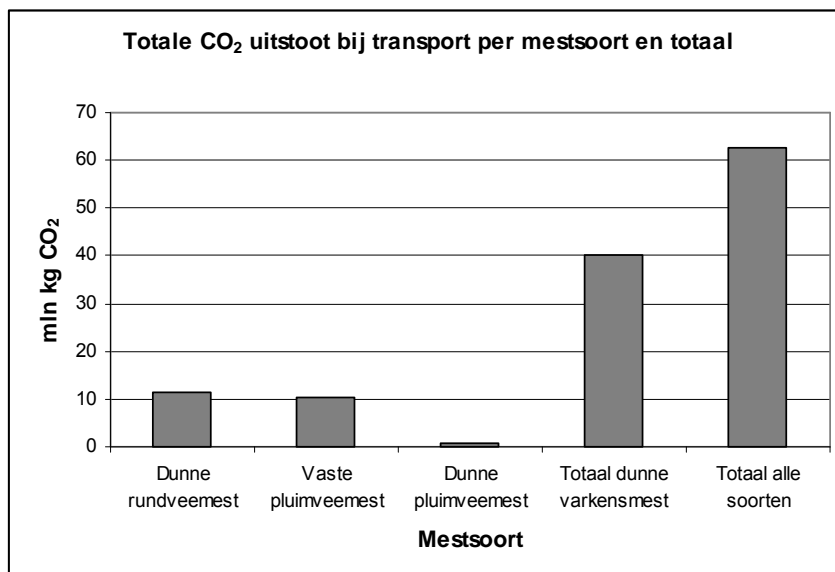
Ketenonderdeel		NH ₃	N ₂ O	CH ₄	Geur	Fijnstof
Voer		nvt	nvt	nvt	nvt	*
Dier		nvt	nvt	*	nvt	*
Mest	Huisvesting	*	*	*	*	*
	Buitenopslag	*	*	*	nvt	nvt
	Weide	*	*	*	nvt	nvt
	Toediening	*	*	nvt	*	*

2.3 CO₂-emissie door mesttransport

Koolstofdioxide (CO₂) is een broeikasgas. De CO₂ die bijdraagt aan het broeikaseffect emitteert wanneer fossiele brandstoffen verbruikt worden om energie op te wekken. De CO₂ die als stofwisselingsproduct van de dieren ontstaat en die uitgedemd wordt, draagt niet bij aan het broeikaseffect omdat deze behoort tot de zogenaamde kleine kringloop waarin de uitgedemde CO₂ weer opgenomen wordt door de planten. In de mestketen beschouwen wij in dit onderzoek, volgens de afbakening zoals beschreven in hoofdstuk 2.1, de CO₂-emissie door transport van mest.

De Nederlandse mestproductie bedraagt in totaal 69 mld kg, 14% daarvan wordt getransporteerd en 69% daarvan is dunne varkensmest (CBS, 2008). In Figuur 2 is de totale uitstoot van CO₂ door transport weergegeven. Om deze CO₂ uitstoot ten gevolge van het transporteren van mest te berekenen zijn gegevens gebruikt over de hoeveelheid vervoerde mest (in dit geval de gemiddelde waarde van 2004-2006), over het aantal verreden km en over de uitstoot CO₂ per verreden km of zoals gebruikelijk per ton km. De uitstoot van Nederlandse vrachtauto's voor beroepsgoederenvervoer gemeten 'aan de pijp' was 115 g CO₂ per ton km (Brink en Wee, 1997). Bij de berekeningen die hebben geleid tot de resultaten in Figuur 2 is ervan uitgegaan dat voor het binnenland de gemiddelde transportafstand 50 km is, wanneer mest naar het buitenland wordt vervoerd wordt 150 km rijafstand aangenomen. Er wordt vanuit gegaan dat alleen met volle mesttanks gereden wordt en er wordt geen rekening gehouden met het rijden van een leeg voertuig (VLM, 2005; De Vries, 2006). Het grootste deel van de mest wordt afgevoerd naar landbouwbedrijven binnen Nederland (zo'n 98%). Ook voor dunne rundveemest geldt dat ongeveer 98% van het geheel op landbouwbedrijven wordt aangevoerd. Bijna alle mest van pluimvee wordt afgevoerd als vaste mest, daarvan gaat zo'n 80% naar het buitenland (CBS, 2008).

In totaal wordt bij transport van mest ca. 62 mln kg CO₂ equivalenten geproduceerd. De totale landbouw emitteerde in 2006 18.3 Tg CO₂ equivalenten aan CH₄ en N₂O (Maas et al., 2008), mesttransport naar derden is daar 0.3% van.



Figuur 3 Totale CO₂ uitstoot bij transport per mestsoort en totaal (gemiddelde van 2004-2006).

Bovenstaande leidt er toe dat de CO₂-uitstoot in het kader van onderhavig onderzoek verminderd kan worden door het aantal km te verminderen of de hoeveelheid vervoerde mest (ervan uitgaande dat trein- en watertransport voor de gemiddelde transportafstanden geen efficiënt alternatief is). Omdat de maximaal te bereiken reductie met 0.3% ten opzichte van de overige broeikasgassen CH₄ en N₂O marginaal is, wordt deze emissie verder in het rapport buiten beschouwing gelaten.

3 Emissiebepalende factoren

3.1 Dierfactoren

3.1.1 Diercategorie en massa van de dieren

Een leghen neemt minder en ander voer op dan een melkkoe, herkaut niet, produceert een ei en geen melk en scheidt faeces en urine niet gescheiden uit, met urinezuur als eiwit-stofwisselingsproduct in plaats van ureum. Een leghen leeft op een kleiner leefoppervlak dan een koe en het mestoppervlak zal dus ook kleiner zijn. Met andere woorden: verschillende diercategorieën hebben verschillende karakteristieken die effect hebben op voerhoeveelheid en -samenstelling (paragraaf 3.1.2), mesthoeveelheid (paragraaf 3.2.3) mestsamenstelling (paragraaf 3.2.1) en de oppervlakte van de mest (paragraaf 3.2.2). Daarnaast heeft een leghen een andere thermoneutrale zone (warmtebehoefte) en ventilatiebehoefte dan een koe. De luchttemperatuur en de luchtsnelheid in de stal zullen dus anders zijn, wat weer consequenties kan hebben voor de temperatuur van de mest. Deze aspecten komen aan bod in paragraaf 3.2.5 en 3.3 over respectievelijk mesttemperatuur en omgevingsfactoren. Het effect van diercategorie is procesmatig dan ook indirect en is intrinsiek geen emissiebepalende factor. De emissies van verschillende diercategorieën zullen op grond van de genoemde karakteristieken verschillen en zullen in de betreffende hoofdstukken aan de orde komen.

De emissie van NH_3 , N_2O , CH_4 , geur en fijnstof nemen toe wanneer de massa van de dieren toeneemt, d.w.z. wanneer het aantal en/of het gewicht van de dieren toeneemt. Dit komt niet alleen omdat meer N-, C-, geur- en fijnstof-componenten in de stal komen door een grotere hoeveelheid mest, maar ook omdat om deze dieren te huisvesten een grotere oppervlakte nodig is. Wanneer dit zich ook uit in een grotere mestoppervlakte kan dit een toename van emissies teweeg brengen, maar niet van de emissiefactoren die worden uitgedrukt per dier, per ton mest of ten opzichte van TAN (Totaal ammoniak-N) in de mest voor respectievelijk huisvesting, buitenopslag en toediening. Gedurende de groei zal het metabolisme van het dier veranderen, waardoor de mestsamenstelling verandert. Deze aspecten komen aan de orde in paragraaf 3.2.1, 3.2.2 en 3.2.3 over respectievelijk mestsamenstelling, mestoppervlakte en mesthoeveelheid. Een tweede effect van het toenemen van dierlijke massa in de stal is dat hierdoor de dierlijke warmteproductie stijgt, resulterend in een hogere staltemperatuur waardoor, in geval van mechanische ventilatie, de ventilatie moet toenemen om de gewenste staltemperatuur te handhaven. Dit veroorzaakt een toenemende luchtsnelheid over het emitterend oppervlak. Deze aspecten komen aan de orde in paragraaf 3.3 over effecten van omgevingsfactoren. Effecten van leeftijd van de dieren en aantallen dieren op de emissies zijn dus procesmatig vooral indirect. Diermassa is dus, net als diercategorie intrinsiek geen emissiebepalende factor. Maatregelen die effect hebben op de diercategorie, het aantal dieren of de groei van de dieren kunnen de emissiefactor uiteraard wel beïnvloeden.

Fijnstof

Voor de stofemissie is er voor twee aspecten wel een direct effect van aantallen dieren. Allereerst is het dier zelf een bron van stofemissie door huidschilfers, veren en haren. Ten tweede is stofvorming weliswaar een aspect van stofemissie, maar als de stof niet door krachten in de lucht komt is er geen emissie. Dieractiviteit is een belangrijke factor waardoor stof in de lucht komt (Aarnink & Ellen 2006). Meer diermassa betekent over het algemeen meer dieractiviteit en, gecombineerd met een toenemende bron, een hogere emissiefactor voor fijnstof. Tabel 2 geeft aan wat het directe effect is van het toenemen van de diermassa in de stal is.

Tabel 2 Effect van aantallen dieren en groei van de dieren¹ op de emissiefactoren van de verschillende ketenonderdelen (grijze cel: niet van toepassing; 0 = geen effect; * = wel effect, ? = onbekend)

Ketenonderdeel		NH ₃	N ₂ O	CH ₄	Geur	Fijnstof
Voer						0
Dier				0		*
Mest	Huisvesting	0	0	0	0	0
	Buitenopslag	0	0	0		
	Weide	0	0	0		
	Toediening	0	0		0	0

¹ Alleen directe effecten op de emissie zijn bedoeld. Indirecte effecten via mesteigenschappen en omgevingsfactoren komen in betreffende hoofdstukken aan de orde

3.1.2 Voersamenstelling

Het effect van voer- en wateropname op de emissies heeft in eerste instantie betrekking op het effect van voer op de mestsamenstelling en de daarmee samenhangende invloed op emissies vanuit de huisvesting, buitenopslag, weide en tijdens toedienen. Voersamenstelling heeft in die zin een indirect effect op de emissies. Dit indirecte effect op de emissies komt in hoofdstuk 3.2 aan bod. Hier wordt volstaan met directe effecten van de voersamenstelling op emissies.

NH₃

Het effect van voersamenstelling op de emissie van NH₃ is indirect en komt aan bod in hoofdstuk 3.2 over mesteigenschappen.

N₂O

Het effect van voersamenstelling op de emissie van N₂O is indirect en komt aan bod in hoofdstuk 3.2 over mesteigenschappen.

CH₄

De endogene emissie van CH₄ zal toenemen wanneer door de voersamenstelling grotere energetische verteringsverliezen optreden (Crutzen et al. 1986; Rijnen 2003). Energetische verteringsverliezen nemen toe bij afnemende verteerbaarheid van de organische stof door bijvoorbeeld een hoger ruw celstofgehalte van het voer. CH₄-emissie is substantieel wanneer sprake is van pensfermentatie van herkauwers zoals runderen, schapen en geiten, maar ook eenmagige dieren kennen endogene methaanverliezen in de darmen.

Geur

Het effect van voersamenstelling op de emissie van geur is indirect en komt aan bod in hoofdstuk 3.2 over mesteigenschappen.

Fijnstof

Aarnink & Ellen (2006) hebben een inventarisatie gemaakt van de effecten van de voersamenstelling op de stofemissie vanaf het voer. Zij vonden dat de volgende factoren de stofemissie van voer beïnvloeden: vocht- en vetgehalte van het voer, de vorm waarin het voer wordt verstrekt, kwaliteit van pelleting, de grondstoffen en het voersysteem. Ook vonden zij dat de samenstelling van het voer geen effect had op de stofemissie afkomstig van mest. Er wordt geen melding gemaakt van het effect van de voersamenstelling op de fijnstofemissies die afkomstig zijn van het dier. Theoretisch kan een matige voersamenstelling effect hebben op bijvoorbeeld de kwaliteit van de huid van het dier, en daarmee op de fijnstofemissie. Gegeven de aanname dat we uitgaan van gezonde dieren zonder subklinische verschijnselen worden deze effecten verwaarloosd.

Tabel 3 geeft aan of er direct invloed is van de opname van voer op de verschillende emissiefactoren van de verschillende mestketenonderdelen. Hieruit blijkt dat de effecten veelal lopen via die van het effect van voer op de mestsamenstelling. De directe effecten beperken zich tot de fijnstofemissie van het voer en de endogene CH₄-productie door de dieren.

Tabel 3 Direct effect van voersamenstelling¹ op de emissiefactoren van de verschillende ketenonderdelen (grijze cel: niet van toepassing; 0 = geen effect; * = wel effect)

Ketenonderdeel		NH ₃	N ₂ O	CH ₄	Geur	Fijnstof
Voer						*
Dier				*		0
Mest	Huisvesting	0	0	0	0	0
	Buitenopslag	0	0	0		
	Weide	0	0	0		
	Toediening	0	0		0	0

¹ Indirecte effecten van voersamenstelling via mesteigenschappen komen in hoofdstuk 3.2 aan de orde

3.2 Mesteigenschappen

3.2.1 Mestsamenstelling

NH₃

Een hoger ammoniumgehalte in de mest zal leiden tot een hogere emissie bij de huisvesting, opslag en bij de toediening. Bij de mesttoediening wordt de emissiefactor als vast percentage genomen van de toegediende hoeveelheid TAN met de mest. Hierbij wordt de emissiefactor gezien onafhankelijk van het TAN gehalte van de mest of de toegediende hoeveelheid mest. Sogaard et al. (2002) geven echter aan dat de emissiefactor afhankelijk is van het TAN gehalte van de mest en de toegediende hoeveelheid mest. Huijsmans et al. (2001 en 2003) geven een beperkte invloed aan van het TAN gehalte en de dosering op de emissiefactor.

Voersamenstelling heeft een effect op de mestsamenstelling. Wanneer het voer veel eiwit bevat zal de N-excretie toenemen en daarmee de kans dat meer N-houdende gasvormige componenten zoals NH₃ en N₂O kunnen emitteren. Wanneer dit echter gepaard gaat met een toename van de consumptie of het gebruik van water kan de concentratie van N in de mest gelijk blijven. In dat geval zal de emissie van NH₃ niet toenemen (Muck en Steenhuis, 1981; Elzing en Monteny, 1997b). Wanneer ruwe celstof aan het dieet wordt toegevoegd zal het metabolisme van het dier veranderen. Canh (1998) vond dat verhoging van het ruwe celstofgehalte van het voer van vleesvarkens door het toevoegen van suikerbietenpulp een substantiële reductie van de ammoniakemissie tot gevolg had ten opzichte van een dieet gebaseerd op door een verschuiving van N-verliezen van urine naar faeces. Close (1993) constateerde dat door toevoeging van stro aan varkensvoer meer vetzuren in de mest kwamen waardoor de pH afnam en meer organisch gebonden N in de faeces terecht kwam dan als ammonium-N in de urine. Omdat ammonium-N de belangrijkste emissiebron voor N-houdende gassen is zal daarmee de potentiële emissie van N₂O en NH₃ afnemen. Ruwe celstof, maar ook toevoegmiddelen, zoals benzoëzuur, die aan het voer worden toegevoegd kunnen de pH van de mest verlagen waardoor minder NH₃ uit NH₄⁺ gevormd wordt en emissie van NH₃ afneemt (Aarnink et al., 2008). Het aanzuren van de mest kan ook direct via toevoegmiddelen aan de mest tijdens opslag of voor toedienen (Bussink, 1994; Huijsmans et al., 1994; Hendriks et al., 1994; Oenema & Velthof, 1993; Velthof & Oenema, 1993). Bij het aanzuren van de mest in opslag (in de stal of buiten) dient aangezuurd te worden tot een pH van 4 omdat de organische stof in de mest een bufferende werking heeft waardoor de pH snel weer hoger wordt. Wanneer echter continu (in tussenopslag) wordt aangezuurd kan worden volstaan met een pH van ca. 5.5 om een ammoniakemissiereductie van 70% te bewerkstelligen (Kai et al., 2008). Aangezuurde mest tot een pH van 4 geeft ook bij het uitrijden van de mest een emissiereductie; het aanzuren heeft dus een effect op de verschillende ketenonderdelen. Aanzuren vlak voor het uitrijden hoeft niet tot pH van 4; ook een hogere pH kan worden aangehouden om een emissiereductie te bewerkstelligen (Bussink, 1994, Huijsmans et al., 1994; Hendriks et al., 1994). Hierbij speelt niet de stabiliteit/buffering van de mest (zoals bij stal en opslag).

Voor de hoogte van de emissie van ammoniak bij toediening is de ammoniumconcentratie in de mest van belang (Generemont & Cellier, 1997; Huijsmans et al., 2001 en 2003; Sogaard et al., 2002). Een hogere concentratie leidt tot hogere absolute emissies. In modelbenaderingen is de emissiefactor, die relatief ten opzichte van de hoeveelheid TAN in de mest wordt bepaald, veelal niet evenredig met het TAN-gehalte van de toegediende mest. Sogaard et al. (2002) gaven een grotere emissiefactor bij verlaging van het TAN-gehalte. Huijsmans et al. (2001 en 2003) gaven een beperkte invloed van het TAN-gehalte op de emissiefactor bij toediening aan, afhankelijk van de toedieningsmethode.

Huijsmans et al. (2001 en 2003) vonden geen effect van het drogestofgehalte van de mest op de emissiefactor van toegediende mest voor het in Nederland uitgevoerde onderzoek; Sogaard et al. (2002) vonden wel een effect bij analyse van Europese data (incl. Nederlandse); een hoger ds-gehalte leidde tot een hogere emissiefactor. Bij specifieke metingen naar het effect van verdunnen werd aangetoond dat verdunnen (1 deel mest en 3 delen water) tot gemiddeld ca 50% emissiereductie kan leiden ten opzichte van onverdunde mest (Huijsmans et al., 1997). Door de mest aan te zuren wordt de ammoniakemissie na toediening aanzienlijk gereduceerd (Bussink et al., 1994; Hendriks et al., 1994; Huijsmans et al. 1994).

Beweiding is vooral van toepassing bij rundvee. De samenstelling van de mest wordt bepaald door de samenstelling van het opgenomen gras. Beïnvloeding van de samenstelling van de mest is in deze situatie betrekkelijk. Bij beperkte weidegang kan wel in de stal bijgevoerd worden met eiwitarmere (energierijke) producten, wat effect heeft op de mestsamenstelling.

Tabel 4 Effect van mestsamenstelling op de emissiefactoren van de verschillende ketenonderdelen (grijze cel: niet van toepassing; 0 = geen effect; * = wel effect)

Ketenonderdeel		NH ₃	N ₂ O	CH ₄	Geur	Fijnstof
Voer						0
Dier				0		0
Mest	Huisvesting	*	*	*	*	*
	Buitenopslag	*	*	*		
	Weide	*	*	*		
	Toediening	*	*		*	*

N₂O

De lachgasemissie uit dunne mest in opslag is vanwege de volledig anaerobe omstandigheden verwaarloosbaar (0,001 kg per kg N volgens de IPCC richtlijn). De emissie uit vaste mest wordt hoger verondersteld (0,02 kg per kg N), vanwege het hoge gehalte aan organische stof en het voorkomen van aerobe omstandigheden. De activiteit van de microbiële populatie in de mest die verantwoordelijk is voor de vorming van N₂O zijn ook afhankelijk van de pH, van de ds en van de concentratie van het substraat (in dit geval NH₄⁺). De N₂O-verliezen na toediening en in de weide worden ook bepaald door microbiële processen, maar dan in de bodem.

CH₄

De concentratie aan (minerale) stikstof en de organische stof zijn van invloed op de CH₄ emissie. Net als bij de microbiële activiteit die zorgt voor nitrificatie en denitrificatie is de activiteit van methanogene bacteriën afhankelijk van omgevingsfactoren als drogestofgehalte, pH en beschikbaarheid van O₂ (Jun et al., 1999; Groenestein, 2006).

Geur

Geur wordt vooral geproduceerd door microbiële omzettingen van voercomponenten in de darmen en na excretie door microbiële omzettingen van mestcomponenten onder anaerobe condities. Harreveld (1981), Willems (1988), Pain et al. (1990a en b, 1991) vonden verschillen in geuremissie bij het uitrijden van aerob en anaerob behandelde mest, gescheiden mest en mestsoort (varkens- of rundermest). Al dit soort behandelingen of verschillen in mestsoort hebben een effect op de mestsamenstelling, waaruit geconcludeerd kan worden dat de mestsamenstelling invloed heeft op de geuremissie. Le (2006) beschrijft dat de eiwitsamenstelling en de fermenteerbare koolhydraten van het voer belangrijke invloedsfactoren zijn. Vooral sulfaathoudende aminozuren dragen bij aan de geuremissie uit de mest. Harreveld (1981) concludeerde dat de emissie na bovengronds uitrijden vele malen hoger is dan uit stallen. Geurverspreiding (afstand) maar ook intensiteit en continuïteit van de geurbron spelen een rol bij de vergelijking tussen de geuremissie vanuit stallen en bij uitrijden.

Fijnstof

Aarnink en Ellen (2006) geven aan dat de voersamenstelling via de mestsamenstelling geen noemenswaardig effect heeft op de fijnstofemissie. Bij mest met een hoog drogestofgehalte, zoals gedroogde pluimveemest zijn hogere fijnstofemissies te verwachten vanuit huisvesting, maar ook tijdens de toediening van mest.

3.2.2 Mestoppervlakte

NH_3

Het mestoppervlak is bepalend voor het contact met de omgeving en daarmee de invloed van omgevingsfactoren op de uitwisseling van gassen en dus de emissie (paragraaf 3.3). Vanuit huisvesting en bij de toediening is aangetoond dat verkleining van het mestoppervlak de ammoniakemissiefactor reduceert. De emissies die afhankelijk zijn van omgevingsfactoren worden mede bepaald door het contactoppervlak tussen mest en lucht. Emissiearme huisvesting op basis van het verkleinen van mestoppervlak is o.a. beschreven door Aarnink (1997), Van Zeeland (1997) en Aarnink et al. (2006).

Emissiearme mesttoedieningstechnieken (injectie, zodenbemesting, strokenbemesting, mest inwerken) verkleinen eveneens het contactoppervlak tussen mest en lucht (o.a. Generemont & Cellier, 1997; Huijsmans et al., 2001 en 2003; Sogaard et al., 2002).

N_2O

Tijdens de opslag is de emissie van N_2O gerelateerd aan het contactoppervlak tussen lucht en mest omdat de beschikbaarheid van O_2 van belang is voor de vorming van N_2O . In opslagsystemen voor drijfmest is dit contactoppervlak dusdanig klein en de C dusdanig laag dat nitrificatie verwaarloosbaar is en daarom ook de N_2O -emissie. Reductie van ammoniakemissie door het verkleinen van het mestoppervlak zal hierop geen effect hebben. Wanneer het strooiselmest betreft kan een vergroting van het oppervlak wel invloed hebben omdat dan zowel C als N beschikbaar zijn om de nitrificatie te starten, zeker als het contactoppervlak tussen mest en lucht vergroot wordt door omwerken of (passieve of actieve) beluchting tijdens compostering

Tijdens de toediening is het mogelijk om de mestoppervlakte te verkleinen door middel van zodenbemesting. Het oppervlak heeft dan geen direct effect op de emissie van lachgas. De emissie is wel hoger bij zodenbemesting, maar dat is een gevolg van de meer anaerobe omstandigheden in de bodem (Chadwick et al., 2000), maar kan ook een gevolg zijn van het meer beschikbare ammonium.

CH_4

De emissie van CH_4 is gerelateerd aan het mestoppervlak in die zin dat er geen CH_4 zal ontstaan wanneer het oppervlak zo groot is dat nauwelijks anaerobe omstandigheden heersen in de mestmassa. Dit is het geval tijdens het toedienen van mest en beweiden (Chadwick and Pain, 1997). De koeienvla kan weliswaar enige anaerobe zones bevatten, maar de methaanemissie wordt verwaarloosbaar verondersteld. Tijdens opslag van mest zullen over het algemeen anaerobe omstandigheden optreden en kan methaanvorming plaatsvinden. In die omstandigheden speelt het mestoppervlak een ondergeschikte rol omdat de vervluchtiging van het eenmaal gevormde onoplosbare CH_4 onafhankelijk van mestoppervlakte, vroeg of laat optreedt. Dit geldt ook voor de faeces in de weide.

Geur

Ogink en Lens (2001) en Mol en Ogink (2002) vonden bij huisvestingssystemen voor varkens met een gereduceerd mestoppervlak een lagere geuremissie. Het lijkt voor de hand te liggen om dit ook door te trekken tot het vergroten van het oppervlak bij het toedienen, maar hiervan is weinig bekend. Verwacht mag worden dat emissiearme mesttoedieningstechnieken door hun oppervlakteverkleining de geuremissie beperken. Pain et al. (1991) vonden een significante reductie van de geuremissie door de mest in de grond in te werken. Metingen voor de verschillende technieken zijn echter niet beschikbaar.

Tabel 5 Effect van mestoppervlakte van de mest op de emissiefactoren van de verschillende ketenonderdelen (grijze cel: niet van toepassing; 0 = geen effect; * = wel effect)

Ketenonderdeel		NH_3	N_2O	CH_4	Geur	Fijnstof
Voer						0
Dier				0		0
Mest	Huisvesting	*	*/0 ^a	*/0 ^a	*	*/0 ^a
	Buitenopslag	*	*/0 ^a	*/0 ^a		
	weide	*	0	0		
	toediening	*	*		*	*/0 ^a

^a drijfmest 0, vaste mest *

Fijnstof

Een toenemend drijfmestoppervlak zal de fijnstofemissie niet beïnvloeden. Wanneer strooiselmest of gedroogde pluimveemest over een groter oppervlak verspreid wordt kan door luchtbeweging meer fijnstof in de lucht komen.

3.2.3 *Mesthoeveelheid*

Over het algemeen geldt dat hoe groter de bron is, hoe meer emissie je kunt verwachten. In de praktijk ontstaat meer mest vooral door meer dieren. De emissiefactoren zullen daardoor niet toenemen omdat die voor huisvesting en opslag uitgedrukt worden per dier of per ton mest. Dit geldt voor alle emissies: NH₃, N₂O, CH₄, geur en fijnstof. Huijsmans et al. (2003) vonden bij toediening wel enige verhoging van de emissiefactor bij verhoging van de mestgift.

Een oorzaak van veranderen van het mestvolume per dier kan in de praktijk ontstaan door verdunning van mest door toenemend waterverbruik door de dieren, toenemend schoonmaakwater of door toevoeging van water. Omgekeerd heeft een verhoging van de ds ook effect op de emissies. Deze effecten zijn niet direct het gevolg van toename van de hoeveelheid mest, maar verandering van mestsamenstelling en vallen onder hoofdstuk 3.2.1.

Tabel 6 Effect van mesthoeveelheid op de emissiefactoren van de verschillende ketenonderdelen (grijze cel: niet van toepassing; 0 = geen effect; * = wel effect).

Ketenonderdeel		NH ₃	N ₂ O	CH ₄	Geur	Fijnstof
Voer						0
Dier				0		0
Mest	Huisvesting	0	0	0	0	0
	Buitenopslag	0	0	0		
	Weide	0	0	0		
	Toediening	*	0		0	0

3.2.4 *Leeftijd van de mest*

De vorming van NH₃ uit ureum-N is snel en na een paar uur na uitscheiding al maximaal (Elzing en Monteny 1997a) en vindt dus over het algemeen op huisvestingsniveau plaats. Wanneer mest ouder wordt zal de toplaag wat ammoniak betreft uitputten en de emissie afnemen omdat geen vorming van ammoniak meer optreedt en/of diffusie van ammoniak uit de diepere mestlagen beperkend wordt voor de emissie (Monteny 2000). Voor de urinezuur in pluimveemest loopt dit proces trager, maar het principe blijft gelijk en ook daar geldt dat als de mest ouder wordt de NH₃ productie en vervluchtiging zal afnemen. Het effect van de leeftijd van de mest loopt dus indirect via een afnemende NH₄⁺ en NH₃-concentratie en is intrinsiek geen emissiebepalende factor. Hetzelfde geldt voor de emissies van CH₄, N₂O en geur. Daarbij speelt dat wanneer mest ouder wordt de samenstelling in die zin verandert, dat meer microben in de mest ontstaan. Productie van gasvormige emissies door microbiële omzettingen zoals CH₄, N₂O en sommige geurcomponenten zal dus toe kunnen nemen. Dit is vooral bekend bij CH₄ waarbij door enting van de mest met oude mest waarin al veel methanogene bacteriën actief zijn, de methaanproductie gestimuleerd kan worden (Zeeman, 1991). Voor fijnstof zou het kunnen zijn dat oude mest een hoger drogestofgehalte heeft waardoor de emissiefactor voor fijnstof toe kan nemen. De effecten van leeftijd van de mest zijn dus indirect, direct gaat het om een veranderende samenstelling van de mest (hoofdstuk 3.2.1).

3.2.5 *Mesttemperatuur*

De omzettingen in de mest die leiden tot emissies zijn chemische en biologische processen. Over het algemeen verlopen deze processen sneller bij een verhoging van de temperatuur. De mesttemperatuur is afhankelijk van de lichaamstemperatuur van het dier, maar vooral ook van de temperatuur van de omgeving en zal afhankelijk van die omgeving meer of minder bijdragen aan de emissies binnen de mestketen. Mesttemperatuur is dus vooral een resultante van omgevingsfactoren en zal in dat betreffende hoofdstuk aan de orde komen. Omgevingsfactoren voor mesttemperatuur in kelder zijn grondwatertemperatuur en staltemperatuur, voor buitenopslag buitentemperatuur en voor

toediening van mest ook buitentemperatuur. Daarnaast speelt de luchtsnelheid over de mest een rol omdat dat mede de snelheid van warmte-overdracht bepaalt (Elzing & Monteny 1997b).

3.3 Omgevingsfactoren

NH₃

Hogere temperaturen en luchtsnelheden verhogen de vervluchtiging van ammoniak uit mestopslagen (Muck & Steenhuis, 1981; Elzing & Monteny, 1997b). Generemont & Cellier (1997), Huijsmans et al. (2001 en 2003); Sogaard et al. (2002), Bussink et al. (1994) tonen aan dat ook de emissiefactor van ammoniak bij mesttoediening beïnvloed wordt door de weersomstandigheden. Hierbij worden genoemd de temperatuur, windsnelheid, straling en relatieve luchtvochtigheid. Verhoging van de lucht(wind)snelheid verhoogt de emissie, evenals een temperatuurverhoging en meer straling. Een hogere luchtvochtigheid kan beperkend werken voor de ammoniakemissie.

N₂O

De temperatuur heeft een positieve invloed op alle biologische processen. Dat betekent dat de emissiefactor voor lachgas hoger is bij hogere omgevingstemperaturen. Luchtsnelheden zullen minder effect hebben op de hoeveelheid N₂O die emitteert, omdat deze stof niet oplosbaar is en dus niet afhankelijk is van evenwicht tussen waterfase en luchtfase. Wanneer meer luchtbeveging een grotere beschikbaarheid van O₂ impliceert, kan dit wel een verhogend effect hebben op de N₂O-emissie.

CH₄

Net als N₂O is de productie van CH₄ afhankelijk van microbiële processen en zal dus toenemen door hogere omgevingstemperaturen. Dat uit zich ook in de hogere methaan conversie factoren (MCF) van mest die de IPCC hanteert in warmere klimaatzones. Ook CH₄ is net als N₂O niet oplosbaar in water en derhalve niet afhankelijk van de luchtsnelheid over het emitterend oppervlak. Wanneer meer luchtbeveging impliceert dat meer aerobe omstandigheden gaan overheersen, kan de CH₄-emissie afnemen.

Geur

Le et al. (2005b) toonden op laboratoriumschaal aan dat zowel een temperatuursverhoging als een verhoging van de luchtsnelheid een verhoging van de geuremissie veroorzaken. Dit komt overeen met de bevindingen van Verdoes en Ogink (1997) dat in varkensstallen de geuremissie per dierplaats lager was bij lagere ventilatie. Deze effecten zijn te verwachten bij opslag en in het veld na toedienen van de mest.

Fijnstof

Luchttemperatuur heeft geen direct effect op de emissie van fijn stof. Indirect wel wanneer in geval van mechanische ventilatie door een verhoging van de staltemperatuur de luchtsnelheid omhoog gaat, of omdat door een hoge temperatuur drogere mest ontstaat. Door een hogere luchtsnelheid kunnen meer stofdeeltjes in de lucht komen of wordt voorkomen dat ze neerslaan (Aarnink en Ellen, 2006).

Tabel 7 Effect van omgevingsfactoren op de emissiefactoren van de verschillende ketenonderdelen (grijze cel: niet van toepassing; 0 = geen effect; * = wel effect)

Ketenonderdeel		NH ₃	N ₂ O	CH ₄	Geur	Fijnstof
Voer						*
Dier				0		*
Mest	Huisvesting	*	*	*	*	*
	Buitenopslag	*	*	*		
	Weide	*	*	*		
	Toediening	*	*		*	*

3.4 Bodemfactoren

Bodemfactoren zijn uiteraard niet van belang voor de emissies uit voer, dier en opslag tijdens huisvesting en buiten. Hier gaat het vooral om emissies van ammoniak, lachgas en methaan bij de toediening van dierlijke mest en bij de excretie van faeces en urine in de weide. De overige bodememissies, als gevolg van het gebruik van kunstmest, en uit bodemvoorraden koolstof en stikstof worden buiten beschouwing gelaten.

De emissies van ammoniak zijn van invloed op de voerproductie aan het begin van de mestketen, maar deze vallen buiten de beschouwde systeemgrenzen. De emissies van lachgas zijn vooral milieukundig relevant. In landbouwkundige zin zijn de lachgasverliezen minder relevant omdat het verlies van stikstof als voedingsstof veel lager is dan bij andere verliesposten als ammoniakvervluchtiging en nitraatuitspoeling.

3.4.1 Grondsoort

NH_3

Een effect van de grondsoort op de emissies van ammoniak bij de toediening van mest lijkt in de uitgevoerde onderzoeken in Nederland afwezig (Bussink et al., 1994; Huijsmans et al., 2001 en 2003).

N_2O

De biologische processen van nitrificatie en denitrificatie zijn de belangrijkste bronnen voor de vorming van lachgas. Uiteraard is het aanbod van minerale stikstof zeer bepalend voor de hoeveelheid stikstof die via lachgasemissie verloren gaat. Daarom is de emissie uit urineplekken, waar plaatselijk zeer hoge concentraties stikstof voorkomen, hoger dan de emissie uit toegediende mest (van Groeningen et al., 2005).

De aanwezigheid van organische stof als energiebron voor de nitrificerende bacteriën is een belangrijke sturende factor voor de emissies van lachgas. Voor de Nederlandse situatie betekent dit dat de emissies van lachgas hoger zijn op veen dan op zand en klei, zowel bij beweiding als bij toediening (Velthof en Oenema, 1995; Van Groeningen et al., 2004). Op veengrond is tegelijkertijd veel organische stof aanwezig, en het stikstofaanbod door mineralisatie hoog. Gelijktijdige toediening van organische stof uit dierlijke mest en nitraat uit kunstmest is ongunstig uit het oogpunt van lachgasemissies (Stevens en Laughlin, 2001; Stevens and Laughlin, 2002, Dittert et al., 2005; Schils et al., 2008).

Tabel 8 Effect van grondsoort op de emissiefactoren van de verschillende ketenonderdelen (grijze cel: niet van toepassing; 0 = geen effect; * = wel effect, ? = onbekend)

Ketenonderdeel		NH_3	N_2O	CH_4	Geur	Fijnstof
Voer						0
Dier				*		0
Mest	Huisvesting	0	0	0	0	0
	Buitenopslag	0	0	0		
	Weide	*	*	?		
	Toediening	*	*		0	0

CH_4

Bodemfactoren hebben geen direct effect op de emissie van methaan uit dieren. De grondsoort heeft via de voerproductie een indirect effect op de methaanemissie uit dieren. In het algemeen bevatten de rantsoenen op veen en klei naar verhouding meer grasproducten en minder maïs dan op zandgrond, waardoor de methaanemissie op veen en klei hoger is dan op zand (Mills et al., 2001). De methaanemissie uit mest bij beweiding is laag en bij toedienen verwaarloosbaar. Het is onbekend of bodemfactoren hierin een rol spelen.

Geur

Voor zover bekend hebben bodemfactoren geen effect op de geuremissie bij toediening.

Fijnstof

Voor zover bekend hebben bodemfactoren geen effect op de emissie van fijn stof bij toediening.

3.4.2 Grondwaterstand, bodemvocht en bodemstructuur

Grondwaterstand en bodemvocht spelen alleen een rol bij de emissies na toediening en bij beweiding.

NH_3

De ammoniakemissie kan beïnvloed worden door de mogelijkheid van infiltratie van de mest in de bodem. Generemont & Cellier (1997) en Sogaard et al. (2002) geven aan dat een hoger bodemvochtgehalte (nat) leidt tot een hogere ammoniakemissie bij mesttoediening. Huijsmans et al. (2001 en 2003) vonden geen significant effect van het bodemvocht op de ammoniakemissie. Mulder & Huijsmans (1994) vonden geen eenduidig effect van een lossere oppervlakkige bodemstructuur op de ammoniakemissie bij bovengrondse mesttoediening op bouwland.

N_2O

De grondwaterstand en het gehalte aan bodemvocht heeft een effect op de emissie van lachgas bij de uitscheiding van mest in de weide en bij de toediening van mest, maar ook de mate van verdichting van de bodem heeft een effect op de emissie van lachgas. Vooral bij veengronden is dit van belang. Zowel bij nitrificatie als denitrificatie wordt de vorming van lachgas gestimuleerd bij een lage zuurstofspanning en bij een hoog vochtgehalte. Echter, onder volledig anaerobe omstandigheden is de lachgasproductie laag omdat dan (i) geen nitrificatie plaatsvindt en (ii) de denitrificatie optimaal verloopt tot het eindproduct N_2 . De hoogste emissies worden gevonden bij een WFPS (Water Filled Pore Space – watergevuuld poriënvolume) van 70 tot 80% (Del Prado et al., 2006). Bodemvocht en grondwaterstand zijn uiteraard nauw aan elkaar verwant: hoe hoger de grondwaterstand hoe hoger het bodemvochtgehalte. De lachgasemissie neemt af naarmate de grondwaterstand daalt. Behalve de grondwaterstand, is ook de neerslag van directe invloed op het bodemvochtgehalte. Hevige buien kunnen tot grote pieken in de lachgasemissies leiden. Vermeulen en Mosquera (2009) toonden aan dat door toepassing van rijbanenteelt de bereikte minder verdichte bodemstructuur een aanzienlijke reductie in N_2O emissie geeft.

CH_4

Hogere grondwaterstanden en nattere omstandigheden bevorderen de vorming van methaan. Theoretisch zal de methaanemissie onder nattere omstandigheden hoger zijn, dus ook uit toegediende of bij beweiding uitgescheiden mest. De absolute niveaus zijn echter zo laag dat het niet zo relevant is. Alleen bij graslanden die delen van het jaar onder water staan kan de methaanemissie een substantiële rol spelen.

Geur

Voor zover bekend hebben bodemfactoren geen effect op de geuremissie bij toediening.

Fijnstof

Voor zover bekend hebben bodemfactoren geen effect op de emissie van fijn stof bij toediening. Wellicht zou de emissie van stof lager kunnen indien de bodem vochtiger is.

Tabel 9 Effect van grondwaterstand, bodemvocht en bodemstructuur op de emissiefactoren van de verschillende ketenonderdelen (grijze cel: niet van toepassing; 0 = geen effect; * = wel effect; ? = onbekend)

Ketenonderdeel		NH_3	N_2O	CH_4	Geur	Fijnstof
Voer						0
Dier				0		0
Mest	Huisvesting	0	0	0	0	0
	Buitenopslag	0	0	0		
	Weide	*	*	*		
	Toediening	*	*		0	0

3.4.3 Gewas

Het gewas heeft, vooral op indirecte wijze, een effect op de emissie van ammoniak en lachgas bij de uitscheiding van mest in de weide en bij de toediening van mest. Het gewas heeft geen invloed op de emissies bij voer, dier, en huisvesting en opslag.

NH₃

De aanwezigheid van een gewas, de hoogte van het gewas en het soort gewas is van invloed op de ammoniakemissie bij mesttoediening (Huijsmans et al. 2001, en 2003). Mesttoediening op het gewas kan tot oppervlaktevergroting leiden, echter bij toediening onder een gewas kan het contact met de omgeving juist beperkt worden (minder uitwisseling). Indien geen gewas aanwezig is en mest op de onbeteelde grond wordt toegediend is vooral de mate van infiltratie in de bodem van belang voor de emissie.

N₂O

Grasland bevat doorgaans meer organische stof dan bouwland, waardoor de lachgasemissies potentieel hoger zijn (Smith et al., 1998). Belangrijker dan het gewas zelf is waarschijnlijk het type gebruikte mest, namelijk varkensmest op bouwland en rundermest op grasland, en het beheer van gewasresten op bouwland. In potproeven is aangetoond dat varkensmest resulteert in hogere lachgasemissies dan rundermest (Velthof et al., 2003). Recente veldexperimenten bevestigen dat. Bij akkerbouwgewassen kan het onderwerken van stikstofrijke gewasresten tot extra lachgasemissies leiden.

CH₄

Het gewas heeft geen effect op de emissie van methaan bij toediening en beweiding.

Geur

Voor zover bekend heeft het gewas geen effect op de geurverspreiding bij toediening. Theoretisch zou een hoger gewas tot een lagere geurverspreiding kunnen leiden.

Fijnstof

Voor zover bekend heeft het gewas geen effect op de emissie van fijn stof bij toediening. Theoretisch zou een hoger gewas meer stof kunnen afvangen, en tot een lagere verspreiding van fijn stof kunnen leiden.

Tabel 10 Effect van gewas op de emissiefactoren van de verschillende ketenonderdelen (grijze cel: niet van toepassing; 0 = geen effect; * = wel effect; ? = onbekend)

Ketenonderdeel		NH ₃	N ₂ O	CH ₄	Geur	Fijnstof
Voer						0
Dier				0		0
Mest	Huisvesting	0	0	0	0	0
	Buitenopslag	0	0	0		
	Weide	*	0	0		
	Toediening	*	*		?	?

4 Integrale emissiereductie-maatregelen

Uit hoofdstuk 3 blijkt uit de tabellen 4, 5 en 7 dat maatregelen die betrekking hebben op respectievelijk mestamenstelling, mestoppervlak en omgevingsfactoren de meest integrale oplossingen bieden om meerdere emissies in meerdere ketenonderdelen te reduceren. Deze aspecten zijn uitgewerkt naar maatregelen voor respectievelijk opslag van mest (huisvesting en buiten), toedienen en beweiden. In Tabel 11 is voor de verschillende maatregelen bij huisvesting en opslag, toediening en beweiden aangegeven hoe deze uitwerken op de verschillende emissies. De categorie m.b.t. overige maatregelen behelst maatregelen die niet onder de eerdergenoemde categorieën passen maar die toch van belang zijn vanwege de integrale effecten op de emissies. Overige maatregelen die een enkelvoudig effect hebben, zoals bijvoorbeeld het scheuren van grasland, meer klaver, management t.a.v. kunstmesttoediening of olievernellen zijn daarom niet opgenomen in de tabel.

In Tabel 11 zijn veelal de effecten van afzonderlijke maatregelen benoemd. Sommige maatregelen werken als reductie door in de gehele keten, vooral die betrekking hebben op de mestamenstelling. Andere maatregelen die enkel een reducerend effect hebben aan het begin van de mestketen kunnen gedeeltelijk teniet gaan indien verderop in de keten geen afdoende maatregelen worden getroffen. Daarnaast zullen een aantal maatregelen tot interacties leiden, daarbij elkaar soms versterkend of soms tegenwerkend. Zo kan regen tot een reductie van ammoniakemissie leiden, maar ook dusdanige bodemomstandigheden veroorzaken dat juist N₂O emissies gaan toenemen. De effecten van verschillende maatregelen moeten dus in bedrijfsverband met elkaar bekeken worden.

Tabel 11 Effecten van integrale maatregelen op de verschillende emissies tijdens opslag van mest in de huisvesting en/of opslag buiten, bij de mesttoediening en bij beweiding. – maatregel die emissie verlaagt; + maatregel verhoogt de emissie; 0 neutraal; ? uitwerking onbekend; - /0/+/? maatregel kan verschillende kanten uitwerken of is onvoldoende bekend (?).

		NH3	N2O	CH4	geur	fijnstof
Huisvesting en opslag	Maatregelen m.b.t. mestamenstelling					
	Mest verdunnen	-	-	-	-	0
	Voersamenstelling veranderen	-	-	-	-	0
	Toevoegmiddelen aan voer	-	-	-	-	0
	Toevoegmiddelen aan mest (zuur, ureaseremmers, nitrificatieremmers)	-	?	-	-	0
	Genetische N-verteerbaarheid verbeteren	-	-	0	0	0
	Opslagputten reinigen na legen	0	0	-	0	0
	Expliciet voor vaste mest					
	Excretie in stro voorkomen	?	?	?	?	+
	Minder stro verstrekken	-?	-	-	?	-/+
	Strooiselmest bevochtigen	+	+	?	+	-
	Ontstoffen van stro	0	0	0	0	-
	Diepstrooisel toepassen	?	+	+	?	-
		Maatregelen m.b.t. mestoppervlakte				
Mest verwijderen	-	-	-	-	-	
Oppervlak mestopslag verkleinen	-	0	0	-	-	
Continu urine afvoeren	-	-	0	?	?	
Bevuild oppervlak verkleinen door sturen mestgedrag	-	0	0	-	-	
Mest afdekken	-	-	-	-	-	
Mest beluchten	-	+	?	?	?	
	Maatregelen m.b.t. omgevingsfactoren					
Mest koelen	-	-	-	-	0	
Luchtbeweging over emitterend oppervlak verlagen door opslag te compartimenteren	-	0	0	-	-	
Luchtbeweging over emitterend oppervlak verlagen door ventilatie te verlagen	-	0	0	-	-	
Expliciet voor vaste (pluimvee)mest						
Luchtbeweging over emitterend oppervlak vergroten om (pluimvee)mest te drogen	-	?	?	-	0	
	Maatregelen m.b.t. overig					
Luchtwassers (biologisch, chemisch)	-	0	0	-	-	
Vegetatie en landschapselementen	-	0	0	-	-	
Beweidingsduur vergroten	-	-	-	-	-	

		NH3	N2O	CH4	geur	fijnstof	
Toediening	Maatregelen m.b.t. mestsamstelling						
	Mest verdunnen	-	-	0	-	0/+	
	Toevoegmiddelen aan mest (zuur, ureaseremmers)	-	?	0	0/+	0	
	Nitrificatieremmers	0	-	0	?	0	
	Overige toevoegmiddelen	0/?	0/?	0	0/?	0	
	<hr/>						
		Maatregelen m.b.t. mestoppervlakte					
		Emissiearme mesttoediening grasland (diverse methoden)					
		Zodenbemesting	-	+	0	-	0
		Sleufkouter	-	0/?	0	-	0
		Sleepvoeten	-	0/?	0	-	0
		Emissiearme mesttoediening bouwland (diverse methoden)					
		Injectie	-	+	0	-	0
		Oppervlakkig inwerken	-	0	0	-	0
		Zodenbemesting	-	+/?	0	-	0
		Inregenen	-	?	0	-/?	0
<hr/>							
	Maatregelen m.b.t. omgevingsfactoren						
	Minder wind	-	0	0	-	0	
	Minder straling, lagere T, hoge RV	-	-	0	-	0	
	Regen	-	+0	0	-	0	
	Optimale gewasomstandigheden (hoger gewas)	-	0	0	-	0	
	Bodemcondities (droger)	+0/-	-	0	?	0	
	Lossere bodemstructuur/voorkomen verdichting	-	-	0	?	+?	
<hr/>							
	Maatregelen m.b.t. overig						
	Meer ammonium kunstmest (geen nitraat)	+	-	0	0	0	
	Precisiebemesting	-	-	0	-	0	
	Gewasresten afvoeren	-	-	0	0	0	
	Lagere kunstmestgift	-	-	0	0	0	
Weide	Maatregelen m.b.t. mestsamstelling						
	Rantsoensamstelling - lager N gehalte	-	-	-0/+	0	0	
	Rantsoensamstelling - hogere verteerbaarheid energie	-0/+	-0/+	-	0	0	
	Rassenkeuze gras	-	-	0	0	0	
	<hr/>						
		Maatregelen m.b.t. mestoppervlakte nvt					
		Maatregelen m.b.t. omgevingsfactoren					
		Vermijden van natte omstandigheden	0/+	-	0	0	0
	<hr/>						
		Maatregelen m.b.t. overig					
	Beweidingsduur verlagen	+	-	+	0	0	
	Beweidingsduur verhogen	-	+	-	0	0	

4.1 Toelichting maatregelen

4.1.1 Maatregelen mestsamstelling

In hoofdstuk 3.2.1 is beschreven dat maatregelen die de mestsamstelling beïnvloeden, de fysisch-chemische eigenschappen van de mest veranderen die ten grondslag liggen aan de vorming en de vervluchtiging van de gasvormige elementen en fijnstof. Via de mestsamstelling kunnen emissies gereduceerd worden door de concentratie aan elementen en nutriënten te verlagen door te verdunnen, maar ook meer indirect door de verteerbaarheid te verhogen via voersamstelling of door genetische maatregelen. Er zijn voermaatregelen bekend die de ammoniakemissie verlagen, of die van geur of methaan. Aarnink en Ellen (2006) geven aan dat dit geen effect zal hebben op de fijnstofemissie. Overall zullen door manipulatie van de samenstelling van drijfmest veel emissies verlaagd kunnen worden in de hele keten. Kruisgevoeligheden zijn echter vaak niet bekend. Kwalitatief kan bijvoorbeeld wel gesteld worden dat NH₃-emissiereductie CH₄ emissie kan reduceren

omdat NH_3 remmend werkt op de methanogene bacteriën, maar of het in de praktijk ook daadwerkelijk tot uitdrukking komt is de vraag.

Toevoegmiddelen aan mest, maar ook aan het voer hebben meestal tot doel de chemische evenwichten zodanig te manipuleren dat de ongewenste stof minder gevormd wordt.

Het reinigen van de opslagputten is een maatregel die de mestsamenvorming verandert, in die zin, dat weinig oude mest aanwezig is die reeds veel methanogene activiteit heeft. Verse mest kan op die manier niet 'geënt' worden met bacteriële activiteit die de vorming van methaan zou versnellen. Zonder deze enting duurt het, afhankelijk van de temperatuur, enkele weken voordat de methaanvorming in volle gang is.

Voor vaste mest zijn nog andere maatregelen toe te voegen die bacteriële omzettingen vertragen door de C/N verhouding te verlagen door minder stro te verstrekken. Anderzijds kan de emissiebron verkleind worden door via sturing van het mestgedrag van varkens, te zorgen dat mest niet in het stro terecht komt. Groenestein et al. (2007) toonden evenwel aan dat in een diepstrooiselsysteem voor zeugen minder ammoniak gevormd werd wanneer meer in het stro gemest werd en minder in de put onder de roosters terecht kwam. Voor anders ingerichte strooiselstallen kan dit anders uitpakken, zoals bij pluimvee, in Canadese strooiselstallen (Aarnink et al., 2004) of in het systeem voor vleesvarkens van Kaiser (1999). Het effect van minder mest in het stro op de N_2O emissie kan tweërlei zijn: de emissiebron neemt af, maar tegelijkertijd wordt de C/N verhouding gunstig voor microbiële omzettingen, waardoor risico op N_2O -emissie toeneemt. Wanneer meer in het stro gemest wordt zal de stromest vochtiger worden wat reducerend werkt op de fijnstofemissie omdat stof beter blijft plakken op het oppervlak en minder gemakkelijk via krachten van externe factoren in de lucht gebracht kan worden. In geval van pluimveemest dat gedroogd wordt om ammoniakemissie te voorkomen zal vocht dit juist verhogen. Omdat vocht alle bacteriële activiteit verhoogt kan ook verwacht worden dat onder de overwegend aerobe omstandigheden de N_2O vorming kan toenemen, evenals de vorming van geurcomponenten. Omdat CH_4 onder aerobe omstandigheden niet zoveel voorstelt zal deze ook niet toenemen door extra vocht. Wanneer de omstandigheden anaerob worden door bevochtigen kan deze echter ook toenemen.

Is met drijfmest nog een tendens te bespeuren ten aanzien van emissiereductie, voor vaste mest hangen de effecten van de maatregelen op de emissies vaak af van de soort mest en de omstandigheden door het stro- en mestmanagement, waardoor geen eenduidige uitspraak te doen is. Dit wordt ook bediscussieerd door Groenestein (2006) en Ellen et al. (2007) en uit zich in Tabel 11.

Verdunnen van de mest kan toegepast worden tijdens de toediening op het land. Naast een concentratieverlaging in de mest kan het extra vocht ook leiden tot een versnelde infiltratie in de bodem. Beide dragen bij aan beperking van ammoniakemissie (Huijsmans et al., 1997). Verwacht mag worden dat de N_2O emissie ook verlaagt, maar bij grotere hoeveelheden (volumes) kan de verdunning mogelijk ook leiden tot tijdelijk vochtiger omstandigheden boven in het bodemprofiel, zodat de N_2O emissie gestimuleerd wordt. De bodemcondities kunnen dan een rol gaan spelen.

In de weide is de mogelijkheid om de mestsamenvorming te beïnvloeden kleiner dan in de stal, maar niet geheel onmogelijk. Het stikstofgehalte van het opgenomen gras kan verlaagd worden door later in te scharen, maar dat kan de verteerbaarheid van de organische stof verlagen waardoor de methaanemissie kan toenemen. Door een gerichte rassenkeuze is het mogelijk om de stikstofbenutting van gras te verhogen, waardoor het gras bij een gelijke drogestofopbrengst een lager stikstofgehalte heeft. Dit kan vervolgens leiden tot een lager stikstofgehalte in de mest wat reducerend is voor de emissie van de N-houdende componenten NH_3 en N_2O .

4.1.2 Maatregelen mestoppervlakte

Maatregelen die betrekking hebben op het mestoppervlak betreffen maatregelen die het contact tussen lucht en mest beïnvloeden. Over het algemeen kan gesteld worden dat het verkleinen van het mestoppervlak, of het verkorten van de tijd dat lucht over het oppervlak beweegt een verlagend effect heeft op de meeste emissies. In drijfmest heeft het op oplosbare componenten, zoals NH_3 en enkele geurcomponenten, meer effect dan op componenten die niet oplosbaar zijn zoals N_2O en CH_4 . In vaste mest spelen andere processen een hoofdrol en is de beschikbaarheid van zuurstof door meer of

minder beluchting maatgevend voor de emissies. Afhankelijk van de emissie, de soort mest en de omstandigheden kan dat meer of minder zijn.

De meeste emissiearme toedieningsmethoden werken volgens het principe van oppervlakteverkleining. Emissiearme mesttoediening kan met verschillende (erkende) methoden worden toegepast met verschillende gradaties voor beperking van ammoniakemissie met mogelijk daarbij (afhankelijk van de omstandigheden) een andere emissie van N₂O.

4.1.3 Maatregelen omgevingsfactoren

Maatregelen die betrekking hebben op omgevingsfactoren van opgeslagen mest betreffen koeling of reduceren van de luchtbeweging over het emitterend oppervlak. De eerste heeft een reducerend effect op de gasvormige emissies, maar voor zover bekend niet op fijnstof. Luchtbeweging kan zoals Tabel 11 aangeeft op twee manieren effect hebben en minder luchtbeweging zal vooral een reducerend effect hebben op de oplosbare emissies. Indien, in geval van pluimveemest, de luchtbeweging verhoogd wordt om mest te drogen, zal de fijnstofemissie toenemen.

Bij de toediening zijn de emissies van ammoniak en N₂O sterk afhankelijk van de weers- en bodemomstandigheden. Bij de ammoniakemissie zijn het meer de momentane omstandigheden, terwijl bij de lachgasemissie de langere termijn omstandigheden een rol spelen. Optimale omstandigheden (weer, bodem) door te schuiven met het tijdstip van de bemesting kan voor beide leiden tot emissiereductie. Dit kunnen geschikte weersomstandigheden tijdens en gedurende enkele dagen na de bemesting zijn, maar ook het tijdstip van de bemesting kiezen afhankelijk van bodemvocht- en gewascondities. Bij de overige maatregelen valt op dat voor ammoniak- én lachgasemissie de maatregelen precisiebemesting en gewasresten afvoeren beide reducerend werken. Het (verder) beperken of voorkomen van bodemverdichting door verdere bodemdrukverlaging (gewichtverlaging, bandenkeuze, rijbanenteelt, mestaanvoer met een sleepslang) kan bijdragen aan verdere verlaging van emissies (Vermeulen & Mosquera, 2009).

Het is in beperkte mate mogelijk om het moment van beweiding af te stemmen op de weersomstandigheden. Door natte omstandigheden te vermijden kan de lachgasemissie worden verlaagd.

4.1.4 Maatregelen overig

De overige maatregelen bij huisvesting en opslag betreffen luchtzuiveringstechnieken zoals luchtwassers en landschapselementen. De eerste hebben zich bewezen effectief te zijn voor meerdere emissies (Melse et al., 2009). Hofschreuder (2008) liet zien dat landschapselementen kunnen werken, maar dat de effectiviteit nog bewezen moet worden. Bij luchtzuivering zal de emissiereductie verderop in de keten in stand blijven tenzij de weggevangen emissie wordt teruggevoerd in de mest, bijvoorbeeld via het spui van de luchtwassers. De derde maatregel is het vermijden van emissie in stal en opslag door de excretie van mest in de wei terecht te laten komen. Velthof et al., 2009b hebben afgeleid uit meetgegevens van Bussink (1996) dat de weide-emissies voor NH₃ zeer laag waren en dat hier dus winst in de keten te halen is. Wanneer de dieren in de stal gemolken worden of beperkt weiden is er naast weide-emissie echter ook stalemissie tijdens de weide-uren en is de winst dus praktisch beperkt. Ook wat betreft methaan en geuremissie mag reductie verwacht worden. Beweidingsduur en N₂O-emissie zijn echter weer positief gecorreleerd en deze zal derhalve toenemen.

Deze categorie maatregelen heeft voor wat betreft toediening grotendeels betrekking op de stikstofbenutting van het gewas, dat zich vooral uit in een lagere lachgasemissie. Veel maatregelen richten zich op het verlagen van het nitraatgehalte in de bodem, zoals het gebruik van ammoniummeststoffen (geen nitraat), het verlagen van de kunstmestgift en precisiebemesting. Andere maatregelen voorkomen het gelijktijdig aanwezig zijn van gemakkelijk afbreekbare organische stof en nitraat, zoals het afvoeren van gewasresten. De beweidingsduur is van invloed op de hoeveelheid mest in de weide, en daarmee op de emissie van NH₃, N₂O en CH₄.

5 Modelmatige benadering

In hoofdstuk 3 is voor de onderdelen van de mestketen weergegeven wat de emissiebepalende factoren zijn en hoe ze doorwerken in de keten en op andere emissies. In hoofdstuk 4 is specifiek uitgewerkt wat het effect van de diverse integrale maatregelen is op de emissies van ammoniak, lachgas, methaan, fijn stof en geur. Daaruit blijkt duidelijk dat er allerlei interacties optreden bij emissiereducerende maatregelen. Enerzijds betekent dit dat maatregelen gericht op één specifieke emissie, zowel positieve als negatieve effecten kunnen hebben op de andere emissies. Anderzijds kunnen maatregelen, genomen op een bepaald punt in de mestketen, doorwerken naar andere onderdelen van de keten.

De analyse beperkte zich tot een kwalitatieve inschatting van de richting van het effect. Om een stap verder te komen, naar een integrale kwantitatieve analyse, is het noodzakelijk om gebruik te maken van een modelmatige aanpak. Immers, vrijwel alle onderliggende kennis is gebaseerd op studies van een beperkt aantal typen emissies en een beperkt aantal verklarende factoren. Experimenten waarin hele bedrijfssystemen of de hele mestketen zijn meegenomen zijn uiterst zeldzaam. Zo ze al zijn uitgevoerd, hebben ze betrekking op één bepaald huisvestingsstelsel, één bepaalde opslagmethode en één toedieningstechniek die vaak specifiek zijn voor het land waarin het onderzoek is uitgevoerd zodat vertaling naar de gemiddelde Nederlandse situatie niet eenvoudig is (Amon et al., 2001). Een modelmatige aanpak is de enige mogelijkheid om grip te krijgen op de complexe interacties tussen alle factoren. Modellen kunnen op onderdelen in de praktijk gevalideerd worden.

In de volgende paragraaf wordt een overzicht gegeven van beschikbare modellen, van eenvoudige spreadsheets tot zeer complexe modellen, die op enigerlei wijze een raakvlak hebben met het onderliggende thema. Deze modellen zouden nader bestudeerd moeten worden om na te gaan of ze als basis kunnen dienen voor een integraal model.

5.1 Beschikbare modellen

Harmonisatie model ammoniak (nationaal)

Methodiek voor de monitoring van opgetreden NH₃-emissies uit de landbouw in Nederland op nationaal niveau. Een rekenmethodiek waarmee de NH₃-emissies uit stallen, mestopslagen, bij beweiding en bij toediening van mest en kunstmest aan de bodem kunnen worden berekend. Alle emissiefactoren worden gebaseerd op TAN (totaal ammoniakaal N) in plaats van op totaal N, wat tot op heden gebruikelijk is (Velthof et al., 2009b).

K&K modellen

Koeien & Kansen is bezig met de ontwikkeling van een reeks tools waarmee gasvormige verliezen bedrijfsspecifiek kunnen worden vastgesteld. De tools maken gebruik van rekenregels waarover in de wetenschap consensus is.

BEX (bedrijfsspecifieke excretie) berekent de excretie van de veestapel, maar niet de emissies daaruit. Ongeveer 40% van de veehouders gebruikt deze tool.

BEA (bedrijfseigen ammoniak) borduurt voort op BEX. Het TAN-aandeel in de N-excretie wordt berekend en de emissies daaruit (stal, opslag, uitrijden) en die uit kunstmest worden berekend. BEA is een afgeleide van het nationaal harmonisatiemodel, echter nu gericht op bedrijfsniveau (dit model bevindt zich nog in de ontwikkelfase).

BEM (bedrijfseigen methaan) is een tool die technisch goed werkt en die op enkele bedrijven is getoetst. Ook deze tool borduurt voort op BEX. Een sterk gestripte versie staat op internet en is vrij beschikbaar. De voorkeur gaat uit naar de ontwikkeling van een tussenvorm: technisch goed en boervriendelijk.

BEL (bedrijfseigen lachgas) berekent de N-bodemoverschotten van het bouw- en grasland van de bedrijven en koppelt daar denitrificatiefactoren aan die afhankelijk zijn van grondsoort en waterhuishouding. Verondersteld wordt dat een bepaalde fractie van het gedenitrificeerd nitraat als lachgas emitteert. Dit is geen praktijkrijke tool maar een benadering in het onderzoek. Is vrij eenvoudig bruikbaar te maken voor de brede praktijk.

Koei'N 2.0

Koei'N 2.0 simuleert de kunstmest-N behoefte per ha van een melkveebedrijf op basis van invoergegevens van, onder meer, melkproductie per ha, eiwitgehalte van het rantsoen, zelfvoorzieningsgraad voor voer, melkproductie per koe en jongveebezetting, evenals oppervlakteverhoudingen van snijmais-beweid grasland-gemaaid grasland. Onder meer aan de hand van emissiefactoren en benuttingsgraden wordt berekend hoeveel voer-N geproduceerd kan worden met de effectief beschikbare dierlijke mest. Tenslotte wordt een N-aanvoer en -afvoerbalans opgesteld en het N-overschot op die balans toegewezen aan ammoniakverliezen en bodembelasting. (Schröder, 2000; Schröder et al., 2003)

Farmmin

FARMMIN is een model voor de simulatie van nutriëntenstromen op een melkveebedrijf. Het primaire doel is het bestuderen van effecten van managementbeslissingen. FARMMIN simuleert nutriëntenstromen (inclusief nutriëntenverliezen zoals uitspoeling van nitraat en vervluchtiging van NH_3) en rendabiliteit. Op een melkveebedrijf zijn gewas- en dierlijke productie onderling afhankelijk door het gebruik van mest voor de productie van voer. De output bevat ook gegevens over kunstmestgebruik en hoeveelheid toegediende mest (kg/ha per jaar), aan- en verkopen (kg/jaar), gras- en maïsopbrengsten (kg/ha/jaar), rantsoenen van de dieren, gemaaide fracties, nutriënt overschot, nitraatuitspoeling, ammoniak vervluchtiging, N_2O -emissie, voerkosten, kunstmestkosten, kosten van mesttransport (Reidy et al., 2008; Van Evert et al., 2007).

BBPR / DAIRYWISE

Het BedrijfsBegrotingsProgrammaRundvee (BBPR) is een empirisch bedrijfsmodel voor de Nederlandse melkveehouderij. Het model simuleert de technische, milieukundige en economische processen. De belangrijkste component is de voedervoorziening, die de behoefte vanuit het melkvee en het aanbod aan voer op elkaar afstemt. Het model berekent de emissie van de broeikasgassen methaan, lachgas en koolstofdioxide (Schils et al., 2006 en 2008)

MITERRA

Miterrra-Europe is een deterministisch model dat de stikstofkringloop in de regio's (NUTS-2) van 27 EU-lidstaten simuleert. Het model kan een aantal maatregelen doorrekenen voor de beperking van stikstofverliezen naar lucht en water. Naast de lachgasemissie, berekent Miterra eveneens de methaanemissie (Velthof et al., 2009a).

INITIATOR

Het INITIATOR model (Integrated Nitrogen Impact Assessment Tool on a Regional Scale) is ontwikkeld om stikstofplafonds per regio te schatten en om effecten van landbouwkundige maatregelen door te rekenen op zowel de emissies van lachgas en ammoniak naar de atmosfeer als de uit- en afspoeling van nitraat en ammonium naar grondwater en oppervlaktewater. (De Vries et al., 2003)

Bij de berekening is een regionale differentiatie aangebracht, door rekening te houden met verschillen in bodemgebruik, grondsoort en grondwaterstand, die bepalend zijn voor de optredende processen. INITIATOR2 is een verdere verfijning en uitbreiding van INITIATOR, en omvat alle relevante aspecten van de mestproblematiek, te weten: (i) emissies van ammoniak, NH_3 , de broeikasgassen N_2O , CH_4 en CO_2 , fijn stof en stank naar de atmosfeer en (ii) de accumulatie en uit- en afspoeling van koolstof, stikstof (NH_4 , NO_3^- en organisch gebonden N), fosfaat en zware metalen (denk aan koper en zink toevoer via de mest) naar grond- en oppervlaktewater

6 Conclusies

- Gasvormige stikstofverliezen (ammoniak en lachgas) treden op in de mestcomponent van de keten: in huisvesting en opslag, bij beweiding en bij toediening. Methaanverliezen treden vooral op bij de diercomponent, via pensfermentatie, en bij de mestcomponent, via huisvesting en opslag. Ook bij beweiding treedt methaanemissie op, maar die is zeer laag. Geur komt vrij uit huisvesting en bij de toediening van mest. Emissies van fijnstof komen in alle componenten van de mestketen voor, van voer, via dier tot mest.
- Maatregelen om emissies te reduceren dienen integraal geëvalueerd te worden om afwenteling verderop in de keten te voorkomen en om afwenteling op andere ongewenste emissies te voorkomen.
- Er zijn weinig maatregelen die over de hele mestketen heen, integraal emissies reduceren.
- Maatregelen die betrekking hebben op mestsamenstelling, mestoppervlakte en/of omgevingsfactoren zijn maatregelen die de meest integrale effecten hebben als het gaat om emissies van meerdere componenten. Alleen maatregelen m.b.t. de mestsamenstelling zijn tevens effectief verderop in de keten.
- Vaste mest is in principe alles wat niet drijfmest is, en in die zin zeer divers van samenstelling. Omdat behalve anaerobe omstandigheden, ook aerobe omstandigheden kunnen optreden in vaste mest zijn meerdere microbiologische processen van invloed op de vorming en de emissie van gasvormige componenten. Hierdoor zijn effecten van maatregelen moeilijker in te schatten dan bij drijfmest. Daarbij geldt dat voor vaste mest weinig onderzoeksgegevens beschikbaar zijn.
- Er is weinig kennis over emissies van geur en fijnstof bij toedienen en beweiden. Zeker de emissie van geur zal naar verwachting niet verwaarloosbaar zijn. Bij het toedienen van gedroogde mest is risico van fijnstofemissie niet te verwaarlozen.
- De bijdrage van mesttransport aan de broeikasgasemissies uit de landbouw is zeer gering.
- In een integrale benadering zijn de effecten van maatregelen veelal wel kwalitatief, maar niet kwantitatief in te schatten, vooral als het om maatregelen gaat die niet expliciet op de betreffende emissie gericht zijn. Dit geldt voor emissies uit drijfmest én voor emissies uit vaste mest.

7 Aanbevelingen

- In onderhavige studie is mestbenutting door gewasgroei niet opgenomen. De N₂O vervluchtiging die hierbij optreedt, is eveneens niet belicht. Het verdient aanbeveling dit wel mee te nemen in de ketenbenadering.
- Er is meer onderzoek nodig naar de emissie van fijnstof en geur bij de toediening en effecten van emissiereducerende maatregelen hierbij.
- Om integraal emissies te reduceren zijn combinaties van maatregelen nodig, zowel binnen ketenonderdelen als tussen ketenonderdelen. Waakzaamheid op kruisgevoeligheden is gewenst.
- Om kwantitatieve inschattingen te doen van integrale effecten van maatregelen is een modelbenadering nodig. Er zijn diverse modellen ontwikkeld, een eerste aanzet zou zijn deze op bruikbaarheid te toetsen, om vervolgens daarop door te gaan om een integraal model te ontwikkelen. De analyse en de interpretatie in dit rapport bieden een goed uitgangspunt.
- Met een integraal model dienen scenariostudies verricht te worden om inzicht te geven in effectiviteit van maatregelen in de hele keten. Tevens leveren de modellen op deze manier duidelijke prioriteiten bij het vullen van kennislacunes.
- Om meer inzicht te krijgen in de emissiefactoren van vaste mest is meer onderzoek nodig, met nadruk op de kwantitatieve aspecten.
- Ontwikkelingen in de veehouderij dienen tegen het “emissie-licht” gehouden te worden.

Literatuur

- Aarnink, A.J.A., 1997. Ammonia emission from houses for growing pigs as affected by pen design, indoor climate and behaviour. Thesis Wageningen University, IMAG DLO-report 97-03, ISBN 90-5406-151-0, Wageningen, 175 pp.
- Aarnink A.J.A., A. Hol, G.M. Nijeboer, 2008, Ammonia emission factor for using benzoic acid (1% VevoVitalIO) in the diet of growing/finishing pigs. ASG report 133, Lelystad, NL.
- Aarnink, A.J.A., Schrama, J.W., Heetkamp, M.J.W., Stefanowska, J., Huynh, T.T.T., 2006. Temperature and body weight affect fouling of pig pens. *Journal of Animal Science*, 2224–2231.
- Aarnink, A.J.A. & H. Ellen, 2006. Processen en factoren bij fijnstofemissie in de veehouderij. ASG-rapport 11, Wageningen-UR.
- Aarnink, A.J.A., M. Wagemans & G.M. Nijeboer, 2004. Emissies uit een welzijnsvriendelijke stal voor vleesvarkens; het Canadian Bedding System. *Agrotechnology & Food Innovations*, Rapport 084, ISBN 90-6754-759-X, Wageningen, 19 pp.
- Amon, B., Th. Amon, J. Boxberger & Ch. Alt, 2001. Emissions of NH₃, N₂O and CH₄ from dairy cows housed in a farmyard manure tying stall (housing, manure storage, manure spreading). *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 60: 103–113
- Bouwman, A. F. (1996). Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 46, 53-70.
- Bouwman, A. F., Boumans, L. J. M., and Batjes, N. H. (2002). Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochemical Cycles* 16.
- Brink, R.M.M. van den en Wee, G.P. van, 1997. Energiegebruik en emissies per vervoerswijze. Rijksinstituut voor volksgezondheid en milieu, RIVM, Bilthoven.
- Buijsman, E., J.P. Beck, L. van Bree, F.R. Cassee, R.B.A. Koelemeijer, J. Matthijsen, R. Thomas en K. Wieringa, 2005. Fijn stof nader bekeken. De stand van zaken in het dossier fijn stof. Milieu- en Natuurplanbureau Rapport 500037008, Bilthoven, NL.
- Bussink, D.W., J.F.M. Huijsmans & J.J.M.H. Ketelaars, 1994. Ammonia volatilization from nitric-acid-treated cattle slurry, (surface) applied to grassland. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 42: 293-309.
- Bussink, D.W., 1996. Ammonia volatilization from intensively managed dairy pastures. PhD thesis, Wageningen University, ISBN 90-5485-629-7, pp 177
- Canh, T.T., 1998. Ammonia emission from excreta of growing-finishing pigs as affected by dietary composition. PhD Thesis Agricultural University Wageningen / IMAG report 98-05, The Netherlands, 163 pp
- CBS, 2003. Statline. Permanent Onderzoek Leefsituatie (POLS). Statistics Netherlands, Voorburg/Heerlen, Netherlands.
- CBS, 2008. [StatLine. Dierlijke mest en mineralen; productie naar diercategorie](#). CBS, Voorburg/Heerlen.
- Chadwick, D. R., and Pain, B. F. (1997). Methane fluxes following slurry applications to grasslands soils: laboratory experiments. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 63, 51-60.
- Chadwick, D. R., Pain, B. F., and Brookman, S. K. E. (2000). Nitrous oxide and methane emissions following application of animal manures to grassland. *Journal of Environmental Quality* 29, 277-287.
- Chardon, W. J., en K. W. van der Hoek. 2002. Berekeningsmethode voor de emissie van fijnstof vanuit de landbouw. Alterra-rapport 682 (RIVM-rapport 773004014), Wageningen.
- Close, W.H., 1993. Fibrous diets for pigs. In: *Animal production in developing countries*, (eds. M. Gill, E. Owen, G.E. Pollot & T.L.J. Lawrence), p. 107-117.
- Crutzen, P. J., I. Aselmann & W. Seiler, 1986. Methane production by domestic animals, wild ruminants, other herbivorous fauna, and humans. *Tellus* 38B: 271-284.
- Del Prado, A., Merino, P., Estavillo, J. M., Pinto, M., and Gonzalez-Murua, C. (2006). N₂O and NO emissions from different N sources and under a range of soil water contents. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74, 229-243.
- De Vries, W., J. Kros, O. Oenema & J. de Klein, 2003. Uncertainties in the fate of nitrogen II: A quantitative assessment of the uncertainties in major nitrogen fluxes in the Netherlands. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 66, 71-102.
- De Vries, J.W., 2006. Kwantitatieve analyse van de milieubelasting van drie organische mestketens en kunstmest. Bachelorscriptie Agrotechnologie, Wageningen Universiteit.

- Dittert K, Lampe C, Gasche R, Butterbach-Bahl K, Wachendorf M, Papen H, Sattelmacher B and Taube F 2005 Short-term effects of single or combined application of mineral N fertilizer and cattle slurry on the fluxes of radiatively active trace gases from grassland soil. *Soil Biology & Biochemistry*. 37, 1665-1674.
- Elzing, A. & G.J. Monteny, 1997a. Ammonia emission in a scale model of a dairycow house. *Transactions of the ASAE* 40: 713-720.
- Ellen, H., K. Groenestein, M. Smits, 2007. Emissies uit opslag van vaste mest. ASG Rapport 58, Wageningen UR.
- Elzing, A. & G.J. Monteny, 1997b. Modeling and experimental determination of ammonia emission rates from a scale model dairy-cow house. *Transactions of the ASAE* 40: 721-726.
- Firestone, M. K., Firestone, R. B., and Tiedje, J. M. (1980). Nitrous-Oxide from Soil Denitrification - Factors Controlling Its Biological Production. *Science* 208, 749-751.
- Géneremont, S, & P. Cellier, 1997. A mechanistic model for estimating ammonia volatilization from slurry applied to bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology* 88:145-167.
- Groenestein, C.M. & H.G. van Faassen, 1996. Volatilization of ammonia, nitrous oxide and nitric oxide in deep-litter systems for fattening pigs. *Journal of Agricultural Engineering* 65, p. 269-274.
- Groenestein, C.M., 2006. Environmental aspects of improving sow welfare with group housing and straw bedding. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- Groenestein, C.M., G.J. Monteny, A.J.A. Aarnink and J.H.M. Metz, 2007. Effect of urinations on the ammonia emission from group-housing systems for sows with straw bedding: Model assessment. *Biosystems Engineering* 97: 89-98
- Harreveld, A., 1981. De geuremissie tijdens en na het verspreiden van varkensmest. IMAG rapport 37, Wageningen, NL.
- Hofschreuder, P., 2008. Inzet van groenelementen rond agrarische bedrijven om luchtkwaliteit te verbeteren; een quick scan, ASG-Rapport 136, Wageningen UR.
- Groot Koerkamp, P.W.G., 1994. Review on emissions of ammonia from housing systems for laying hens in relation to sources, processes, building design and manure handling. *Journal of Agricultural Engineering Research* 59: 73-87
- Hendriks, J.G.L., E.M. Mulder & J.F.M. Huijsmans, 1994. Aanzuren van rundermest; mestsamenstelling bij aanzuren vlak voor het uitrijden en ammoniakemissie na toediening van aangezuurde mest op grasland. IMAG-DLO rapport 93-30, IMAG-DLO, Wageningen, pp. 38.
- Hobbs, P. J., T. H. Misselbrook, and B. F. Pain. 1998. Emission rates of odorous compounds from pig slurries. *J. Sci. Food. Agric.* 77(3): 341-348.
- Huijsmans, J.F.M., E.M. Mulder & D.W. Bussink, 1994. Acidification of slurry just before field application to reduce ammonia emission. International Conference on Agricultural Engineering, Milano, 29th August - 1st September 1994, p. 4-5.
- Huijsmans, J.F.M., J.M.G. Hol & M.M.W.B. Hendriks, 1997. Ammoniakemissie na toediening van verdunde mest. Het effect van de verdunning van mest en andere factoren op de ammoniakemissie na bovengrondse breedwerpige mesttoediening. IMAG-DLO rapport P 97-75, pp. 13.
- Huijsmans, J.F.M., J.M.G. Hol & M.M.W.B. Hendriks, 2001. Effect of application technique, manure characteristics, weather and field conditions on ammonia volatilization from manure applied to grassland. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 49: 323-342.
- Huijsmans, J.F.M. 2003. Manure application and ammonia volatilization. PhD thesis Wageningen University with summaries in English and Dutch, Wageningen, The Netherlands, ISBN 90-5808-937-1, pp 160.
- Huijsmans, J.F.M., J.M.G. Hol & G.D. Vermeulen, 2003. Effect of application method, manure characteristics, atmosphere and field conditions on ammonia volatilization from manure applied to arable land. *Atmospheric Environment* 37: 3669-3680.
- Jong, de, R.G.; J.H.M. Steenbekkers; H. Vos, 2000. Hinder en andere zelf-gerapporteerde effecten van milieuverontreiniging in Nederland, Inventarisatie Verstoringen 1998. TNO-PG, Delft, Netherlands.
- Jun P., M. Gibbs & K. Gaffney, 1999. Methane and nitrous oxide emissions from livestock manure. Background report for expert group meeting on good practice in inventory preparation for agricultural sources of methane and nitrous oxide. 24-26 February, 1999, Wageningen, NL.
- Kai, P., P. Pedersen, J.E. Jensen, M.N. Hansen and S.G. Sommer, 2008. A whole-farm assessment of the efficacy of slurry acidification in reducing ammonia emissions. *European Journal of Agronomy* 28 (2): 148-154.

- Kaiser, S. 1999. Analyse und Bewertung eines Zweiraumkompoststalls für Mastschweine unter besonderer Berücksichtigung der gasförmigen Stoffströme. Ph.D. thesis, VDI-MEG Schrift 334, University of Göttingen, Germany.
- Koziel, J.A., L. Cai, D.W. Wright & S.J. Hoff, 2006. Solid-phase microextraction as a novel air sampling technology for improved, GC-olfactometry-based assessment of livestock odors. *Journal of Chromatographic Science* 44: 451-457.
- Le. P.D., Aarnink, A.J.A., Ogink, N.W.M., Becker, P.M. and M.W.A. Verstegen, 2005a. Odour from animal production facilities: its relationship to diet. *Nutrition Research Reviews* Vol 18 (1): 3-30
- Le. P.D., Aarnink, A.J.A., Ogink, N.W.M. and M.W.A. Verstegen, 2005b. Effects of environmental factors on odor emission from pig manure. *Transaction of the ASAE* 48 (2): 757-765
- Le, P.D., 2006. Odour from pig production: its relation to diet. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- Maas, C.W.M. van der, P.W.H.G. Coenen, P.G. Ruysenaars, H.H.J. Vreuls, L.J. Brandes, K. Baas, G. van den Berghe, G.J. van den Born, B. Guis, A. Hoen, R. te Molder, D.S. Nijdam, J.G.J. Olivier, C.J. Peek, M.W. van Schijndel, 2008. Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990-2006, National Inventory Report 2008, MNP, Bilthoven, NL.
- Melse, R.W., N.W.M. Ogink and W.H. Rulkens, 2009. Air treatment techniques for abatement of emissions from intensive livestock production. *The Open Agriculture Journal* 3: 6-12
- Mills, J.A.N., Dijkstra, J., Bannink, A., Cammell, S.B., Kebreab, E. and France, J. (2001) A mechanistic model of whole-tract digestion and methanogenesis in the lactating dairy cow: Model development, evaluation, and application. *Journal of Animal Science*, 79, 1584–1597
- Mol G. en Ogink N.W.M., 2002. Geuremissie uit de veehouderij II, Overzichtsrapportage 2000 -2002 (in Dutch). Rapport 2002-09. IMAG, Wageningen.
- Monteny, G.J., 2000. Modelling of ammonia emissions from dairy cow houses. Thesis Wageningen University. ISBN 90-5808-348-9, Wageningen, NL, 156 pp.
- Muck, R.E. & T.S. Steenhuis, 1981. Nitrogen losses in free stall dairy barns. In: *Livestock Waste: A renewable resource* p. 406-409. ASAE, St. Joseph, Michigan.
- Mulder, E.M. & J.F.M. Huijsmans, 1994. Bepaling ammoniakemissie bij mesttoediening; overzicht metingen DLO-veldmeetploeg 1990-1993. Onderzoek inzake de mest- en ammoniakproblematiek in de veehouderij 18. DLO, Wageningen, pp. 71.
- Oenema O. & GL Velthof &, 1993. Denitrification in nitric-acid-treated cattle slurry during storage. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 41, 63-80.
- Ogink N.W.M. en Lens P., 2001. Geuremissie uit de veehouderij, Overzichtsrapportage 1996-1999 (in Dutch). Rapport 2001-14. IMAG, Wageningen.
- Pain, B.F., V.R. Phillips, C.R. Clarkson, T.H. Misselbrook, Y.J. Rees & J.W. Farrent, 1990a. Odour and Ammonia Emissions Following the Spreading of Aerobically-Treated Pig Slurry on Grassland. *Biological Wastes* 34, 149-160.
- Pain, B.F., T.H. Misselbrook, C.R. Clarkson & Y.J. Rees, 1990b. Odour and Ammonia Emissions Following the Spreading of Anaerobically-Digested Pig Slurry on Grassland. *Biological Wastes* 34, 259-267.
- Pain, B.F., C.R. Clarkson, V.R. Phillips, J.V. Klarenbeek, T.H. Misselbrook & M. Bruins, 1991. Odour Emission Arising from Application of Livestock Slurries on Land: Measurements Following Spreading using a Micrometeorological Technique and Olfactometry. *J.agric.Engng Res.* 48, 101-110
- Reidy, B., U. Dämmgen, H. Döhler, B. Eurich-Menden, F.K. van Evert, N.J. Hutchings, H.H. Luesink, H. Menzi, T.H. Misselbrook, G.J. Monteny, and J. Webb. 2008. Comparison of models used for national agricultural ammonia emission inventories in Europe: Liquid manure systems. *Atmospheric Environment* 42:3452-3464.
- Rijnen, M.M.J.A., 2003. Energetic utilization of dietary fiber in pigs. Thesis Wageningen University, ISBN 90-5808-866-9, Wageningen, NL, 160 pp.
- Schils, R.L.M., D.A. Oudendag, K.W.. van der Hoek, J.A. de Boer, A.G. Evers en M.H. de Haan, 2006. Broeikasgasmodule BBPR. Praktijkrapport Rundvee 90. Lelystad, 50 pp.
- Schils, R.L.M., M.H.A. de Haan, J.G.A. Hemmer, A. van den Pol-van Dasselaar, J.A. de Boer, A.G. Evers, G. Holshof, J.C. van Middelkoop, en R.L.G. Zom, 2008. DairyWise, A Whole-Farm Dairy Model. *Journal of Dairy Science* 90: 5334–5346
- Schils R L M, Van Groenigen J W, Velthof G L and Kuikman P J, 2008. Nitrous oxide emissions from multiple combined applications of fertiliser and cattle slurry to grassland. *Plant and Soil* 310: 89-101.
- Schröder, J.J. 2000. Koei'N 1.0: stroomdiagram en balans voor stikstof op melkveebedrijven. Nota 37. *Plant Research International*, 13 pp.

- Schröder, J., H.F.M. Aarts, H. Ten Berge, H. Van Keulen, and J.J. Neeteson. 2003. An evaluation of whole-farm nitrogen balances and related indices for efficient nitrogen use. *Eur. J. Agron.* 20:33-44.
- Søgaard, H.T., S.G. Sommer, N.J. Hutchings, J.F.M. Huijsmans, D.W. Bussink & F. Nicholson, 2002. Ammonia volatilization from field-applied animal manure-the ALFAM model. *Atmospheric Environment* 36: 3309-3319.
- Smith, K. A., Thomson, P. E., Clayton, H., McTaggart, I. P., and Conen, F. (1998). Effects of temperature, water content and nitrogen fertilisation on emissions of nitrous oxide by soils. *Atmospheric Environment* 32, 3301-3309.
- Stevens R J and Laughlin R J, 2001 Cattle slurry affects nitrous oxide and dinitrogen emissions from fertilizer nitrate. *Soil Science Society of America Journal.* 65, 1307-1314.
- Stevens R J and Laughlin R J 2002 Cattle slurry applied before fertilizer nitrate lowers nitrous oxide and dinitrogen emissions. *Soil Science Society of America Journal.* 66, 647-652.
- Van Evert, F.K., H.G. Van der Meer, and J.J.M.H. Ketelaars. 2007. Prediction of fecal and urinary N excretion in dairy cattle, In G.-J. Monteny and E. Hartung, eds. *Ammonia emissions in agriculture.* Wageningen Academic Publishers, Wageningen, p. 91-93
- Van Groenigen J W, Kasper G J, Velthof G L, Van den Pol-van Dasselaar A and Kuikman P J 2004 Nitrous oxide emissions from silage maize fields under different mineral nitrogen fertilizer and slurry applications. *Plant and Soil.* 263, 101-111.
- Van Groenigen J W, Velthof G L, van der Bolt F J E, Vos A and Kuikman P J, 2005. Seasonal variation in N₂O emissions from urine patches: Effects of urine concentration, soil compaction and dung. *Plant and Soil.* 273, 15-27.
- Van Zeeland, A.J.A.M., 1997. *Schuine wanden in het mestkanaal van een vleesvarkensstal.* Proefverslag nummer P 4. ISSN 0926 – 9541, Praktijkonderzoek Varkenshouderij, Rosmalen
- Velthof, G. L., Kuikman, P. J., and Oenema, O. (2003). Nitrous oxide emission from animal manures applied to soil under controlled conditions. *Biology and Fertility of Soils* 37, 221-230.
- Velthof, G. L., and Oenema, O., 1993. Nitrous oxide flux from nitric-acid-treated cattle slurry applied to grassland under semi-controlled conditions. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 41, 81-93.
- Velthof, G. L., and Oenema, O., (1995). Nitrous oxide fluxes from grassland in the Netherlands .2. Effects of soil type, nitrogen fertilizer application and grazing. *European Journal of Soil Science* 46, 541-549.
- Velthof, G.L., D. Oudendag, H.P. Witzke, W.A.H. Asman, Z. Klimont en O. Oenema, 2009a. Integrated Assessment of Nitrogen Losses from Agriculture in EU-27 using MITERRA-EUROPE. *Journal of Environmental Quality* (in press)
- Velthof, G.L., C. van Bruggen, C.M. Groenestein, B.J. de Haan, M.W. Hoogeveen en J.F.M. Huijsmans 2009b. Methodiek voor berekening van ammoniakemissie uit de landbouw in Nederland , Wageningen, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOt-rapport 70.
- Verdoes, N. & N.W.M. Ogink, 1997. Odour emission from pig houses with low ammonia emission. *Proceedings of the international symposium Ammonia and odour control from animal production facilities* (J. A. M. Voermans & G. J. Monteny eds), Vinkeloord, NL, p. 317-325.
- Vermeulen, G.D. & J. Mosquera, 2009. Soil, crop and emission responses to seasonal-controlled traffic in organic vegetable farming on loam soil. *Soil & Tillage Research* 102, 126-134.
- VLM, 2005. Administratief onderzoek mesttransport. *Vlaamse landmaatschappij.*
- Willems, P., 1988 ,Kwantificering van de geuremissie van bemeste percelen. Vakgroep Luchthygiene en -verontreiniging, Landbouwniversiteit Wageningen, NL
- Zeeman, 1991. Mesophilic and psychrophilic digestion of liquid manure. PhD thesis of the Agricultural University Wageningen, NL.



Wageningen UR Livestock Research

Edelhertweg 15, 8219 PH Lelystad T 0320 238238 F 0320 238050

E info.livestockresearch@wur.nl | www.livestockresearch.wur.nl