

Scriptie bachelorafsluiting agrotechnologie (FTE-80812)

Verlaging van de emissie van broeikasgas en ammoniak in de melkveehouderij

A. A. Slager

September 2009



© Copyright Atelier Wiebe van der Zee



WAGENINGEN UNIVERSITEIT
WAGENINGEN UR

Verlaging van de emissie van broeikasgas en ammoniak in de melkveehouderij

Kan vergisten of scheiden van mest een emissiereductie opleveren

Naam vak : Bachelorafsluiting agrotechnologie
Nummer : FTE-80812
Omvang : 12 credits
Datum : September 2009

Student : A.A. Slager
Registratienummer : 831108765110
Opleiding : BSc Agrotechnologie

Begeleider(s) : Dr. ir. J.W. Hofstee
Examinator : Prof. dr. ir. P.W.G. Groot Koerkamp
Leerstoelgroep : Farm Technology Group
Bornse Weilanden 9
6708 WG Wageningen
Tel: (0317) 48 29 80
Fax: (0317) 48 48 19
E-mail: office.FTE@wur.nl



Samenvatting

Naast het hoofdproduct melk produceert de Nederlandse melkveehouderij ook grote hoeveelheden feces en urine, waaruit emissies ontstaan die negatieve effecten hebben op het milieu. De broeikasgassen methaan, lachgas en koolstofdioxide dragen bij aan het versterkte broeikas-effect, ammoniak zorgt voor verzuring en vermesting van land en water.

Het ministerie van LNV heeft bij monde van minister Verburg aangegeven te streven naar een volledig duurzame melkveehouderij in 2023. Dit betekent dat emissie van zowel broeikasgassen als van ammoniak sterk moet worden teruggebracht.

In dit kader is het project 'Kracht van Koeien' uitgevoerd. In dit project is een viertal concepten gepresenteerd die onder andere tot doel hebben genoemde emissies sterk te reduceren. Eén van de manieren waarop emissiereductie bereikt moet worden is het gescheiden houden van feces en urine, zodat twee stromen verkregen worden die dan verder kunnen worden bewerkt.

Het doel van dit onderzoek is om te onderzoeken of het gescheiden houden van feces en urine bij kan dragen aan vermindering van emissie van schadelijke stoffen en aan verbeteren van de effectiviteit van deze producten als meststof. Daarvoor worden drie systemen vergeleken: het in de praktijk veel toegepaste drijfmeststelsel, waarbij feces en urine in de kelder onder de stal tot drijfmest worden samengevoegd, een variatie hierop, waarbij deze drijfmest anaeroob vergist wordt en het primaire scheiden en gescheiden houden van feces en urine.

In de hoofdstukken 2 tot en met 4 worden genoemde systemen achtereenvolgens behandeld. Voor elk systeem wordt vanuit literatuur, per bron de emissie van broeikasgas en ammoniak bepaald om te kunnen komen tot een totale emissie. Ook wordt per systeem onderzocht wat de effectiviteit is van het eindproduct als meststof.

Voor broeikasgasemissie konden waarden gevonden worden voor alle systemen. Voor vergisting van drijfmest en scheiden van feces en urine is een deel van deze gegevens gebaseerd op aannames. Voor ammoniakemissie konden waarden gevonden worden voor het drijfmeststelsel. Voor vergisting van drijfmest en scheiden van feces en urine zijn echter te weinig gegevens beschikbaar om goede waarden te vinden voor alle bronnen.

De gevonden resultaten zijn als volgt samen te vatten:

- In het drijfmeststelsel is de totale broeikasgasemissie 10133 kg CO₂-equivalenten per koe per jaar. Vergisting van drijfmest geeft een emissie van 8778 kg CO₂-equivalenten. Dat is een reductie van 13,4%. De emissie bij scheiden van feces en urine is 8428 kg CO₂-equivalenten per koe per jaar. Dit is een reductie van 16,8% ten opzichte van het drijfmeststelsel. Ten opzichte van vergisten van drijfmest geeft scheiden van feces en urine een geringe emissiereductie van 4%.
- Ammoniakemissie voor het drijfmeststelsel bedraagt 23,8 kg ammoniak per koe per jaar. Het effect van vergisten van drijfmest en scheiden van feces en urine op de ammoniakemissie is onbekend. Wel vindt er een reductie plaats door vermijden van langdurige opslag van mest, maar door ontbreken van gegevens van emissie als gevolg van uitrijden van de meststoffen, is niet duidelijk of het gehele systeem ook in reductie resulteert.
- Digestaat van vergiste drijfmest is effectiever en bruikbaar als meststof doordat het meer vloeibaar is en meer ammoniakale stikstof bevat. Maar de verhouding van de nutriënten sluit net als bij drijfmest, vaak niet aan op de behoeften van het gewas. Scheiden van feces en urine resulteert in een fosfaatrijke dikke fractie en een stikstofrijke dunne fractie. Met deze fracties kan gericht bemest worden op de behoeften van het gewas en de bruikbaarheid is beter dan drijfmest en digestaat.

Inhoud

Samenvatting.....	III
Inhoud.....	V
1. Inleiding	1
1.1. Kader	1
1.2. Doel	2
1.3. Onderzoeksvragen	2
1.4. Opbouw verslag.....	2
1.5. Standaardbedrijf ter ondersteuning van berekeningen	3
2. Emissies uit drijfmest	5
2.1. Oorzaak en effect van emissies	5
2.2. Mesttraject op het melkveebedrijf.....	6
2.3. Samenstelling drijfmest.....	7
2.4. Emissie van broeikasgassen: resultaten en discussie	8
2.5. Emissie van Ammoniak: resultaten en discussie.....	13
2.6. Effectiviteit van drijfmest als meststof.....	14
2.7. Conclusie.....	15
3. Anaerobe vergisting en co-vergisting drijfmest	17
3.1. Anaerobe Vergisting	17
3.2. Vergisting van mest en co-vergisting.....	20
3.3. Mesttraject op het melkveebedrijf bij mestvergisting	22
3.4. Effect van vergisting op samenstelling mest.....	23
3.5. Emissie op het mesttraject bij (co-)vergisting van runderdrijfmest: resultaten en discussie	24
3.5.1 Emissie van broeikasgassen	24
3.5.2 Emissie van Ammoniak	28
3.5.3. Emissie van geurstoffen	29
3.6. Bruikbaarheid en effectiviteit van digestaat als meststof.....	29
3.7. Conclusie.....	30
4. Scheiden van feces en urine	33
4.1. Kracht van Koeien.....	33
4.2. Het mesttraject volgens ‘Kracht van Koeien’	33
4.3. Alternatieve behandeling van mest	34
4.4. Primaire mestscheiding en samenstelling feces en urine	35
4.5. Verdere verwerking scheidingsproducten	37
4.5.1. Verwerking dikke fractie.....	37
4.5.2. Verwerking dunne fractie.....	38
4.6. Emissies op het mesttraject bij scheiden van feces en urine	38
4.5.1. Emissie van broeikasgassen	38
4.5.1. Emissie van ammoniak.....	41
4.7. Bruikbaarheid en effectiviteit van de scheidingsproducten als meststof	42
4.8. Conclusie.....	42
5. Discussie.....	45
6. Conclusie.....	49
7. Aanbevelingen.....	51
Referenties.....	52
Bijlagen	55
Bijlage I.....	55
Bijlage II.....	59

1. Inleiding

De melkveehouderij in Nederland is een sector die volgens schattingen van het LEI ongeveer 18000 melkveehouderijbedrijven omvat (LEI, 2009). Het hoofddoel van deze bedrijven is het produceren van melk. Het resultaat hiervan is dat in Nederland 1,35 miljoen koeien ongeveer 11,5 miljard kilogram melk per jaar produceren (CBS, 2009).

Naast het hoofdproduct worden er ook gewenste en ongewenste bijproducten geproduceerd, die gevolgen hebben voor het milieu. De productie van feces en urine, samengevoegd drijfmest genoemd, bedraagt per koe per jaar ongeveer 25 m³. Deze drijfmest wordt veelal in kelders onder de stal opgevangen en opgeslagen. Een deel van het jaar is het toegestaan om de drijfmest over het gras- of bouwland uit te rijden, waar het dient als bemesting voor het gewas. Zowel uit de koe, als bij opslag van de drijfmest in de kelder en uitrijden over het land, vindt emissie plaats van een aantal schadelijke gassen, waaronder koolstofdioxide (CO₂), methaan (CH₄), lachgas (N₂O) en ammoniak (NH₃).

1.1. Kader

Vanuit de Nederlandse overheid heeft minister Verburg van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) aangegeven dat zij, als onderdeel van het onderzoeksprogramma 'Verduurzaming Productie en Transitie', in 2023 een 100%-duurzame melkveehouderij wil hebben. Een duurzame melkveehouderij is samen te vatten in de volgende punten (LNV *et al.*, 2008; Bos *et al.*, 2009):

- De energie die de melkveehouderij gebruikt in al dan niet fossiele vorm, direct en indirect, wordt effectief gebruikt: zij wordt op een energetisch efficiënte manier omgezet in waardevolle producten of in andere vormen van energie. Zo min mogelijk dient verloren te gaan en het liefst wordt de melkveehouderij een energieproducerende sector;
- De emissie van de broeikasgassen CO₂, CH₄ en N₂O is sterk teruggebracht. Gestreefd wordt naar het bereiken van de laagste emissie aan overige broeikasgassen per liter melk binnen de Europese Unie. Verder naar een reductie van methaanemissie per melkkoe in 2020 van 5% ten opzichte van 2007;
- De emissie van stikstof en fosfor in verschillende chemische vormen, dat zorgt voor verzuring en vermesting, is sterk teruggebracht. Een doel dat hiervoor is gesteld is dat in melkvee- en varkenshouderij in 2020 25% van de mest gescheiden wordt in dunne en dikke fracties, zodat er een reductie van kunstmestgebruik van 15% is en reductie van methaanemissie vanuit de mestopslag.

In het kader hiervan is door de Animal Sciences Group van Wageningen Universiteit en Researchcentrum (WUR) het project 'Kracht van Koeien' uitgevoerd, waarin een viertal concepten voor melkveehouderijsystemen is gepresenteerd. Het uiteindelijke doel is om dierenwelzijn en gezondheid te verbeteren, emissie die milieuschade oplevert te verminderen en het energiegebruik van de sector omlaag te brengen, op zo'n manier dat de boer nog steeds een rendabel bedrijf kan runnen, dat door de maatschappij als wenselijk en functioneel wordt gezien. Eén van de ideeën die in de concepten is geïntegreerd is het scheiden en gescheiden houden van feces en urine van de koe en een verdere behandeling van deze twee stromen. De verdere behandeling kan inhouden dat de feces wordt vergist en dat de urine wordt verwerkt tot een kunstmestvervanger (Bos *et al.*, 2009).

1.2. Doel

Het doel van dit onderzoek is om kwalitatief en kwantitatief te onderzoeken of het gescheiden houden van feces en urine bij kan dragen aan ontwikkeling van een duurzamer veehouderij, door vermindering van uitstoot van schadelijke stoffen en vermindering van (indirect) gebruik van energie. De methode van scheiding van feces en urine wordt vergeleken met de huidige praktijk en met vergisting van drijfmest, al dan niet met co-vergisting.

1.3. Onderzoeksvragen

Dit onderzoek is opgehangen aan de volgende hoofdvraag:

Kan gescheiden inzamelen en verwerken van feces en urine bijdragen aan vermindering van uitstoot van schadelijke stoffen in de Nederlandse melkveehouderij en wat is het effect op de bruikbaarheid als meststof?

Dit betekent dat dit onderzoek voorbij gaat aan de manier waarop feces en urine gescheiden ingezameld kunnen worden. Er wordt uitgegaan van twee gescheiden stromen waarmee verder gewerkt kan worden. Dit in tegenstelling tot de huidige praktijk van mengen van feces en urine tot drijfmest.

Om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden is er een antwoord nodig op een aantal deelvragen en daaruit voortvloeiende subvragen:

1. Wat zijn de negatieve effecten van feces en urine in de vorm van drijfmest, hoe groot zijn deze effecten, wat zijn de bijdragen per bron en hoe effectief is drijfmest als meststof?
2. Wat is het effect van anaerobe vergisting van drijfmest al dan niet in combinatie met co-producten op de samenstelling van de mest, hoe groot zijn de emissies die optreden gedurende het mesttraject, wat zijn de bijdragen per bron en hoe effectief is digestaat als meststof?
3. Wat is het effect van het scheiden van feces en urine op de samenstelling, wat kan met beide stromen gedaan worden, hoe groot zijn de emissies van ammoniak en broeikasgassen, wat zijn de bijdragen per bron en hoe effectief zijn beide stromen als meststof?

1.4. Opbouw verslag

Hoofdstuk 2 bevat een onderzoek naar de emissies van broeikasgassen en ammoniak, die ontstaan als gevolg van de drijfmest geproduceerd door het vee op het Nederlandse melkveebedrijf.

Vervolgens begint hoofdstuk 3 met een beschrijving van de werking van anaerobe vergisting. Verder bevat het een onderzoek naar de mogelijkheid om door middel van vergisting van drijfmest, al dan niet in combinatie met vergisting van andere organische producten, genoemde emissies te reduceren.

Hoofdstuk 4 gaat in op het scheiden van feces en urine. Doel van dit hoofdstuk is te onderzoeken of scheiden van feces en urine een methode is die kan resulteren in een reductie van de uitstoot van broeikasgassen en ammoniak ten opzichte van de huidige praktijk ten opzichte van vergisting van drijfmest.

Elk van de hoofdstukken 2 tot 4 bevat een conclusie en een discussie, waarin de resultaten van het hoofdstuk besproken worden en waarin een tabel met cijfers van de emissies wordt gepresenteerd.

Hoofdstuk 5 bevat een discussie met betrekking tot het gehele verslag, waarna in hoofdstuk 6 conclusies kunnen worden getrokken.

1.5. Standaardbedrijf ter ondersteuning van berekeningen

Voor het vergemakkelijken van het berekenen en vergelijken van gegevens en van de uitkomsten van de verschillende deelvragen is het opstellen van een standaard melkveebedrijf handig.

Dat kan op verschillende manieren.

Omdat dit onderzoek in het kader is van het project Kracht van Koeien, is het een optie om het standaardbedrijf dat zij voorstellen te gebruiken.

Meer passend bij de te behandelen vragen is het om een ‘gemiddeld Nederlands melkveebedrijf’ te gebruiken, want de huidige melkveehouderij en de daar nu gebruikelijke omgang met mest wordt als uitgangspunt genomen, waarna de alternatieve methoden van mestvergistening en van het project Kracht van Koeien hiermee vergeleken kunnen worden. Een dergelijk ‘gemiddeld Nederlands melkveebedrijf bestaat waarschijnlijk in werkelijkheid niet, maar komt wel naar voren uit de kengetallen van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) en het Landbouw Economisch Instituut (LEI). Tabel 1 bevat deze gegevens.

Tabel 1: Gegevens van een gemiddeld Nederlands melkveebedrijf, opgebouwd uit gegevens van CBS en LEI (CBS, 2009; LEI, 2009)

	Hoeveelheid of Type	Eenheid
Koeien	75	Stuk
Melkproductie	7800	$Kg \cdot jaar^{-1} \cdot koe^{-1}$
Land	46	Ha
Weidegang	8	$Uur \cdot dag^{-1}$
Drijfmest	26000	$Kg \cdot koe^{-1} \cdot jaar^{-1}$
Waarvan binnen	21000	$Kg \cdot koe^{-1} \cdot jaar^{-1}$
Waarvan buiten	5000	$Kg \cdot koe^{-1} \cdot jaar^{-1}$
N-excretie	115,6	$Kg \cdot koe^{-1} \cdot jaar^{-1}$
P ₂ O ₅ -excretie	36,9	$Kg \cdot koe^{-1} \cdot jaar^{-1}$
K ₂ O-excretie	156	$Kg \cdot koe^{-1} \cdot jaar^{-1}$
Vervanging	30	%
Vaarzen	25	Stuk
Kalveren	30	Stuk
Drijfmest	11500	$Kg \cdot vaars^{-1} \cdot jaar^{-1}$
Drijfmest		$Kg \cdot kalf^{-1} \cdot jaar^{-1}$
Stal	Ligboxenstal	
Mestopslag	In kelder, 55% van de mest naar buitenopslag	
Totale hoeveelheid mest	2.100.000	$Kg^{-1} \cdot jaar$

Van belang zijn gegevens over de samenstelling en het management van de veestapel en gegevens over de samenstelling van management van de geproduceerde drijfmest.

Naar de gegevens uit Tabel 1 zal in komende hoofdstukken verwezen worden als de gegevens van het standaardbedrijf.

2. Emissies uit drijfmest

Dit hoofdstuk gaat over de negatieve effecten van feces en urine in de vorm van drijfmest, de grootte van deze effecten, de bijdragen per bron en de samenstelling en effectiviteit van drijfmest als meststof.

2.1. Oorzaak en effect van emissies

Op de meeste Nederlandse melkveebedrijven is het in de huidige praktijk de gewoonte om urine en feces van melkkoeien die in de stal geproduceerd worden, samen te voegen tot drijfmest.

Een aantal van de chemische elementen die zich in drijfmest van melkkoeien bevinden, kan leiden tot uitstoot van schadelijke stoffen. Relevant voor dit onderzoek zijn koolstof (C) en stikstof (N). Deze elementen zijn in de drijfmest aanwezig in verschillende chemische verbindingen en kunnen onder invloed van chemische en bacteriële processen ontsnappen. Voor dit onderzoek zijn de volgende schadelijke gassen relevant: koolstofdioxide (CO₂), methaan (CH₄), lachgas (N₂O) en ammoniak (NH₃). Deze stoffen zijn om verschillende redenen schadelijk.

Koolstofdioxide, Methaan en Lachgas worden onder de broeikasgassen geschaard. Deze gassen dragen bij aan het versterkte broeikaseffect. De temperatuur op aarde hangt af van de aanwezigheid van broeikasgassen in de atmosfeer, die de warmtestraling van de zon gedeeltelijk vasthouden. Dit wordt het broeikaseffect genoemd. Voornamelijk sinds de industriële revolutie wordt de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer vergroot door emissie als gevolg van menselijke activiteit. Dit wordt het versterkte broeikaseffect genoemd en leidt tot extra opwarming van de atmosfeer en het aardoppervlak (Buijsman *et al.*, 2004). Nederland heeft zich, door ondertekening van het Kyoto-protocol, verplicht om de emissie van deze broeikasgassen te reduceren.

Hierbij moet bedacht worden dat er verschil is in 'effectiviteit' van deze gassen als broeikasgas. Met het effect van CO₂ als standaard is in Tabel 2 de effectiviteit van methaan en lachgas weergegeven. Deze gassen hebben bij relatief minder uitstoot dus een groter effect. Deze eigenschap wordt Global Warming Potential (GWP) genoemd. Naast dit schadelijke effect leidt het ontstaan van deze gassen tot verlies van koolstof en stikstof uit de landbouw (Thomassen *et al.*, 2008a).

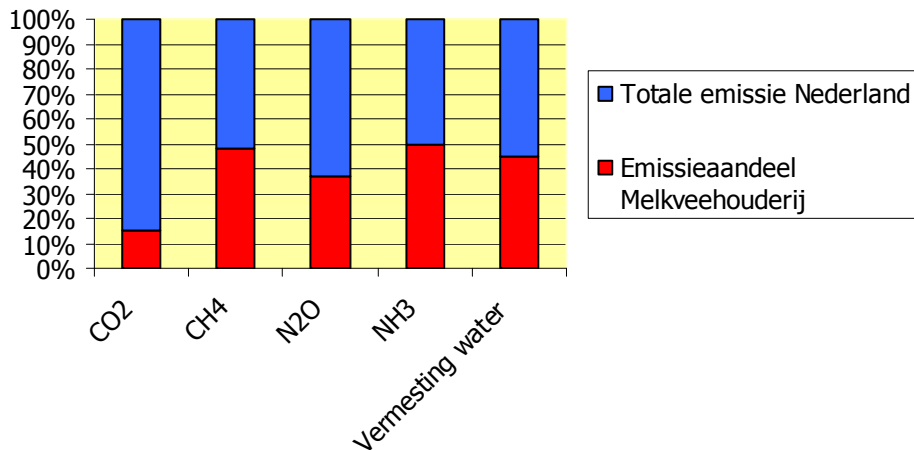
Tabel 2: De global warming potentials van de hier behandelde broeikasgassen (Mol *et al.*, 2003)

Broeikasgas	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
GWP	1	21	310

Ammoniak werkt niet als broeikasgas, maar heeft een vermestende en verzurende werking. NH₃ ontsnapt naar de lucht, maar zal na verloop van tijd weer neerslaan op het aardoppervlak, al dan niet door regen. Op deze manier komt stikstof op plaatsen terecht waar geen stikstof nodig is. (Natuur-)gebieden met schrale gronden en daaraan gekoppelde flora en fauna veranderen door deze depositie. In 2007 was er volgens het milieu- en natuurcompendium een depositie van 2190 mol N/ha, terwijl de doelstelling voor 2010 1650 mol N/ha is (MNC, 2009). Juist voor ammoniak geldt ook sterk dat ontsnapping van ammoniak resulteert in verlies van bruikbare stikstof uit de landbouw en uit de kringloop (Velthof *et al.*, 2009).

De grafiek in Figuur 1 geeft weer wat het aandeel van de melkveehouderij is in de totale Nederlandse emissie van genoemde stoffen. Ook het aandeel dat de melkveehouderij heeft in vermesting van grond- en oppervlaktewater is weergegeven. Hieruit blijkt dat vermindering

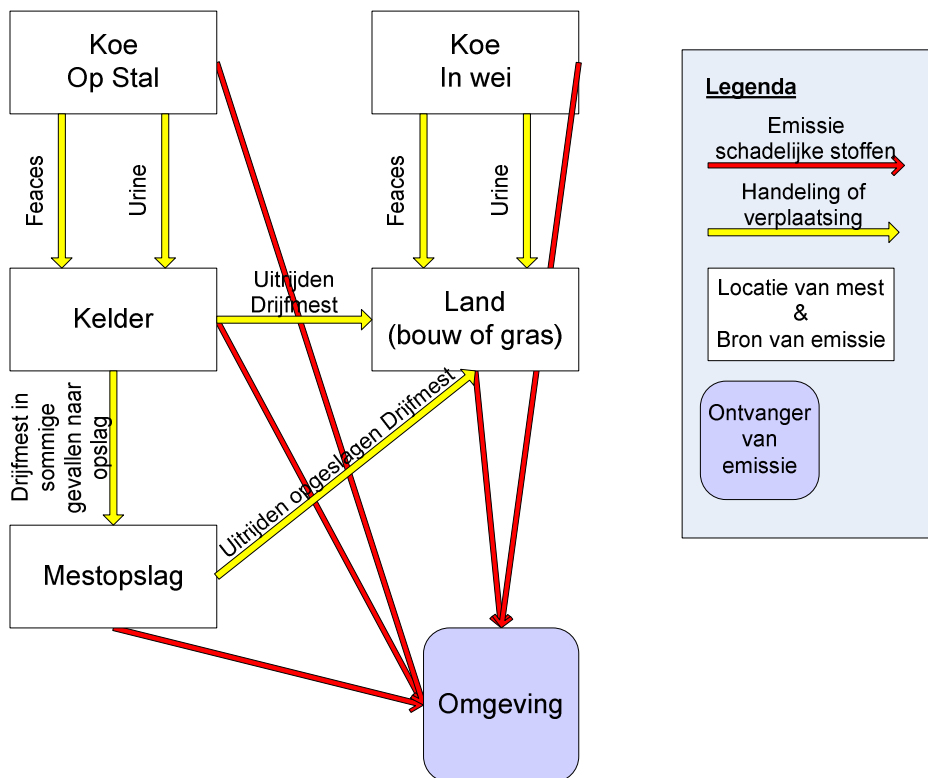
van uitstoot in de melkveehouderij sterk bij zal dragen aan vermindering van de landelijke emissie.



Figuur 1: Aandeel van de melkveehouderij in emissies op nationale schaal (Thomassen et al., 2008b)

2.2. Mesttraject op het melkveebedrijf

Op het Nederlandse melkveebedrijf hebben mest en urine een aantal opeenvolgende verblijfplaatsen, die allemaal resulteren in emissies. Dit mesttraject is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2: Schema met locaties en stroming van drijfmest op een melkveehouderij en de emissies die ontstaan

Een eerste verblijfplaats is de koe als producent. Vervolgens ontdoet de koe zich van mest en urine. Dit gebeurt niet tegelijkertijd. Een deel van deze mest en urine zal in de wei terechtkomen als de koe geweid wordt. De rest komt in de stal terecht. In de stal worden mest

en urine samengevoegd en in de mestkelder als drijfmest opgeslagen. Tijdens een deel van het jaar mag deze drijfmest op het land verspreid worden.

Het schema zal gebruikt worden om de emissies vanuit de verschillende verblijfplaatsen te kwantificeren.

2.3. Samenstelling drijfmest

De samenstelling van drijfmest is afhankelijk van vele factoren. Vooral het rantsoen van de koe bepaalt dit voor een groot deel. Ook zal een hoog productieve koe een andere mestsamenstelling hebben dan een laag productieve koe. Dit betekent ook dat drijfmestsamenstelling door de jaren heen verandert.

Daar komt bij dat er nu in de praktijk ook gestuurd wordt op samenstelling van de mest, door te letten op wat de koe te vreten krijgt. Vooral het stikstofgehalte van de mest probeert men laag te houden, want de samenstelling van drijfmest heeft ook invloed op de emissies van deze drijfmest. Als het N-gehalte laag wordt gehouden, zal dit de emissie van ammoniak verlagen (Smits, 2002).

In verschillende bronnen zijn cijfers te vinden die de mestsamenstelling karakteriseren. In Tabel 3 is hiervan een overzicht gegeven uit zes bronnen. Vervolgens is er een gemiddelde berekend en is de range van deze gegevens aangegeven.

Tabel 3: Gegevens met betrekking tot de samenstelling van drijfmest vergeleken

Bron →	1	2	3	4	5	6		Gem	Range		
Inhoud ↓	Eenheid: kg/m ³ drijfmest						2004	2005		min	max
N-totaal	4,9	5,64	5	4,4	4,4	3,4	3,1	4,4	3,1	5,6	
Organisch N	2,6				2,2	1,9	1,6	2,1	1,6	2,6	
Totaal ammoniakaal N (TAN)	1,9	3			2,2			2,4	1,9	3	
P ₂ O ₅	1,8	1,65		1,6	1,6	1,2	1,3	1,5	1,2	1,8	
K ₂ O	6,8		7		6,2	6	5,8	6,4	5,8	7	
Drogestof	90				86	87	84	86,8	84	90	
Organische stof (OS)	66		60			64	62	63,0	60	66	
Effectieve OS	30		30	33				31,0	30	33	
C/N ratio	7,4					8	12	9,1	7,4	12	
Water			905					905			
Dichtheid drijfmest	1005		1040					1023			

Bronnen:

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 1: (Bodemacademie, 2009) 2: (Mol <i>et al.</i>, 2003) 3: (Wikipedia, 2009) 4: (Akker <i>et al.</i>, 2005) 5: (Schooten, 2005) 6: (Schooten <i>et al.</i>, 2006) |
|--|

Omdat mest een variabele samenstelling heeft, zijn gegevens hierover ook uiteenlopend. Gezien de range in Tabel 3, geven de gegevens een redelijk overeenkomend beeld. Daarom kan in het vervolg het gemiddelde van de waarden genomen worden, zoals deze in Tabel 3 vermeld staan. De dichtheid van drijfmest ligt volgens de gegevens iets boven 1000 kg/m³. Voor vergemakkelijking van berekeningen met de dichtheid wordt als waarde 1000 kg/ m³ genomen. Dit is een afwijking van maximaal 4 procent en zal geen noemenswaardig effect hebben op resultaten als deze waarde consequent wordt gebruikt.

2.4. Emissie van broeikasgassen: resultaten en discussie

De groottes van de emissie van broeikasgassen die optreden op het melkveebedrijf zijn vaak onderzocht. Vaak wordt deze broeikasgasemissie uitgedrukt in het aantal kg CO₂-equivalenten per kg geproduceerde melk. Voor Nederland liggen afhankelijk van de grondsoort emissies gemiddeld tussen 1 en 1,5 kg CO₂-equivalenten per kg melk (Elferink *et al.*, 2008). Thomassen *et al.* geven een uitstoot van 1,4 kg CO₂-equivalent/kg melk en geven aan dat CH₄ hiervan 34% uitmaakt, N₂O 38% en CO₂ 29%.

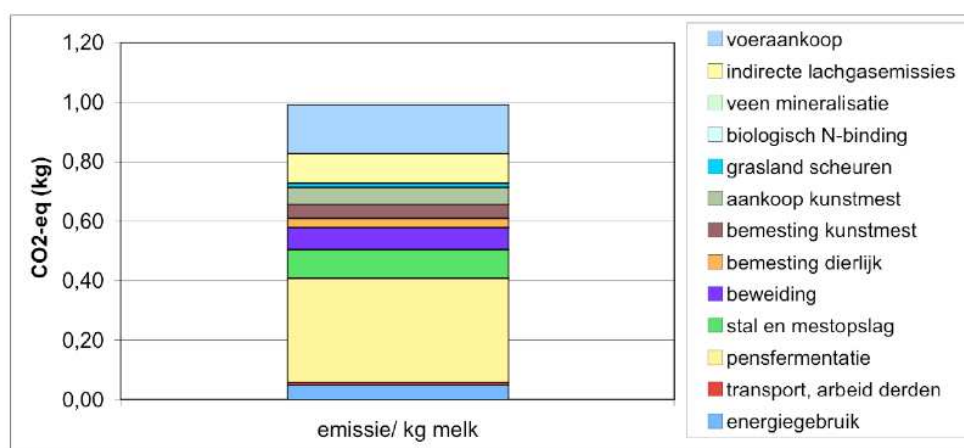
Deze percentages kunnen volgens de GWP's van CO₂, CH₄ en N₂O (zie Tabel 2) worden teruggerekend naar de werkelijke kilogrammen.

1,4 kg CO₂-equivalent \cdot 0,29 = 0,406 kg CO₂ per kg melk.

1,4 kg CO₂-equivalent \cdot 0,34 / 21 = 0,023 kg CH₄ per kg melk.

1,4 kg CO₂-equivalent \cdot 0,38 / 310 = 0,0017 kg N₂O per kg melk.

Vaak wordt bij deze getallen de veenmineralisatie die resulteert in uitstoot van N₂O en optreedt in veengebieden door verlaging van grondwater, niet meegerekend (Elferink *et al.*, 2008). Maar deze 1 tot 1,5 kg CO₂-equivalent kan ook niet geheel worden toegerekend aan de emissiebronnen die met het mesttraject te maken hebben en zijn weergegeven in Figuur 2. In Figuur 3 is een verdeling van de emissie van broeikasgassen over verschillende bronnen op het melkveebedrijf, te zien. Deze verdeling is berekend aan de hand van cijfers van een voorbeeldbedrijf met een totaal van 1 kg CO₂-equivalent per kg melk. Daarom is het nodig specifiek naar de afzonderlijke emissies te kijken en concreet te maken wat de emissies zijn van drijfmest en de omgang daarmee.



Figuur 3: Broeikasgasemissies per kg melk van een voorbeeld bedrijf (Elferink *et al.*, 2008)

Er is een aantal bronnen dat data geeft over de uitstoot van broeikasgassen en ammoniak door drijfmest op het melkveebedrijf, verwerkt. Deze bronnen zijn te vinden en genummerd in Tabel 4. Aan de hand van deze nummering zijn de bronnen ook in de tabellen 5 tot en met 9 te herkennen.

De tabellen 5 tot en met 8 bevatten een overzicht van de cijfers van de emissies van methaan, lachgas, koolstofdioxide, waarbij alles is teruggerekend naar één eenheid, zodat vergelijking mogelijk is.

Voor alle emissies zijn de cijfers omgezet naar kg emissie per jaar per koe, waarbij gebruik is gemaakt van de gegevens van het standaardbedrijf, zoals die zijn weergegeven in Tabel 1. In bijlage I zijn onvereenvoudigde tabellen te vinden, met daarin de originele data zoals ze uit de weergegeven bronnen komen. Ook is in bijlage I te vinden hoe omrekening van de originele gegevens naar de cijfers in tabellen 5 tot en met 9 is gedaan.

Tabel 4: Deze tabel bevat de bronnen en de nummering van die bronnen zoals gebruikt in de tabellen 5 tot en met 9

Nummer	Bron	Nummer	Bron
1	(Huis in 't Veld <i>et al.</i> , 2003)	6	(Elferink <i>et al.</i> , 2008)
2	(Thomassen <i>et al.</i> , 2008b)	7	(Mol <i>et al.</i> , 2003)
3	(Amon <i>et al.</i> , 2006)	8	(Velthof <i>et al.</i> , 2009)
4	(Smink <i>et al.</i> , 2005)	9	(Perdok <i>et al.</i> , 2007)
5	(Vellinga <i>et al.</i> , 2009)	10	(Hees <i>et al.</i> , 2007)

CH₄ Methaan

Methaan ontstaat door bacteriële omzetting van koolstofverbindingen in een anaerobe omgeving. Het merendeel emitteert vanuit de koe zelf (pensfermentatie) en vanuit de mestkelder. (Thomassen *et al.*, 2008a)

Tabel 5: Een overzicht van methaanemissies zoals gevonden in literatuur, omgerekend naar het aantal kg CH₄ per koe per jaar

CH ₄ -emissie	Bronnen								
	1	2	3	4	5	7	9	10	Repr
Totaal kg CH ₄ per koe per jaar	182,5 113 – 259 ¹				208,1	207,8	146 97,5 ²	130	170
Kg CH ₄ per koe per jaar door pensfermentatie	128	113		124,6 117				128	125
Kg CH ₄ per koe per jaar door mestopslag	54,8	37,8	85			32,3 2,5 ³		27,3	40 2,5³
Kg CH ₄ per koe per jaar door beweiden						0,6			0
Kg CH ₄ per koe per jaar door uitrijden mest			0,027			2,1			2
Kg CH ₄ per jaar door jongvee								65 25 ⁴	65 25⁴

¹ : Range voor kg CH₄ per koe per jaar.

² : Het eerste getal direct uit artikel, het tweede berekend uit aantal kg melk.

³ : Kg CH₄ uit een afgedekte buitenopslag.

⁴ : Pink en kalf respectievelijk

In Tabel 5 zijn gegevens voor methaanemissie uit diverse bronnen gepresenteerd. Per bron moet een representatieve waarde gevonden worden. Deze zijn weergegeven in de laatste kolom van Tabel 5 onder repr. De gegevens uit bron 3 (Amon *et al.*, 2006) uit de tabel worden genegeerd met de volgende redenen: Er wordt gezocht naar waarden die representatief zijn voor emissies in de Nederlandse melkveehouderij. Het onderzoek van Amon *et al.* (2006) geeft veel informatie met betrekking tot emissies door rundveemest, maar de gevonden emissies zijn niet representatief voor emissie in de Nederlandse melkveehouderij. Daarvoor is de gebruikte proefopstelling niet geschikt. Mest wordt in een tank opgeslagen en afgedekt met een houten deksel, waarna regelmatig wordt gemeten. Deze manier van mest opslaan is niet representatief voor mestopslag in de mestkelder of in een overdekte mestopslag. Verder is niet duidelijk hoelang de proef geduurd heeft. Duidelijk is dat de waarden in Tabel 5 voor bron 3 sterk afwijken van de waarden uit de overige bronnen, die allen cijfers voor Nederlandse omstandigheden weergeven.

Kg CH₄ per koe per jaar door pensfermentatie:

De gevonden waarden liggen vrij dicht bij elkaar. Het gemiddelde van de vijf waarden is 122 kg CH₄ per koe. De waarden 113 en 117 trekken het gemiddelde naar beneden, waarbij de waarde 117 minder betrouwbaar wordt geacht, aangezien deze op basis van melkproductie is

berekend en dezelfde bron ook de waarde 124,6 geeft. Zonder 113 en 117 komt het gemiddelde op 127 kg. Dan lijkt 125 kg CH₄ per koe per jaar een reële waarde voor pensfermentatie.

Kg CH₄ per koe per jaar door mestopslag:

Er zijn vier waarden gevonden voor opslag in de kelder en één waarde voor opslag in een afgedekte buitenopslag. Deze laatste is 2,5 kg CH₄ per koe per jaar en zal worden gebruikt. De waarden voor opslag in de kelder lopen uiteen van 27,3 tot 54,8 kg. Het gemiddelde is 38 kilogram. Dat betekent dat maar 1 waarde boven het gemiddelde ligt en deze waarde het gemiddelde dus sterk bepaald. Bron 1 lijkt echter wel betrouwbaar, want het onderzoek is geheel gericht op methaanemissie uit stallen. Terwijl bron 10 die de laagste emissie gebruikt, in dit opzicht minder betrouwbaar is. Het rapport doet berekeningen voor een groot gebied en methaanemissie is in het rapport een klein onderdeel. Als de waarde van bron 10 wordt genegeerd, gaat de gemiddelde waarde naar 41,6. Daarom zal voor emissie uit mestopslag in de kelder een waarde van 40 kg CH₄ per koe per jaar worden gebruikt.

Kg CH₄ per koe per jaar door beweiden:

Hiervoor is één waarde gevonden: 0,6 kg CH₄ per koe per jaar. In veel bronnen wordt beweiden niet als bron van methaanemissie genoemd. Verder is deze waarde dermate klein dat het verwaarloosbaar is ten opzichte van de andere emissiebronnen. Daarom wordt aangenomen dat door beweiden geen extra emissie van CH₄ ontstaat.

Kg CH₄ per koe per jaar door uitrijden mest:

Hiervoor is één waarde gevonden. Ook deze waarde is klein, maar zal meegenomen worden als 2 kg CH₄ per koe per jaar.

Totaal kg CH₄ per koe per jaar:

In bron 1 wordt de volgende range voor CH₄-emissie per koe per jaar gegeven: 113-259. Alle andere bronnen vallen binnen die range, behalve 97,5, dat berekend is aan de hand van de melkproductie. Deze waarde wordt genegeerd als te onbetrouwbaar.

Het gemiddelde van de overblijvende waarden is 162 kg CH₄ per koe per jaar. De som van de hierboven aangenomen waarden is 169,5. Deze waarden liggen dicht bij elkaar en 170 kg per koe per jaar zal als waarde genomen worden, zodat alle aangenomen waarden met elkaar overeen komen.

N₂O Lachgas

Lachgas ontstaat vooral op plekken waar aerobe en anaerobe omstandigheden zich dicht bij elkaar bevinden (Dinuccio *et al.*, 2007).

Tabel 6: Een overzicht van lachgasemissies zoals gevonden in literatuur, omgerekend naar het aantal kg N₂O per koe per jaar.

N ₂ O-emissie	Bronnen							
	1	2	3	5	7	8	10	Repr.
Totaal kg N ₂ O per koe per jaar				5,37				2,68
Kg N ₂ O per koe per jaar uit stal / kelder	0	0,145	0,4242		0,145	0,145 ¹ 0,0031	0,0073	0,15
Kg N ₂ O per koe per jaar uit buitenopslag					0	0,0187		0,019
Kg N ₂ O per koe per jaar door beweiden		0,6914			0,6914		2,0743	0,69
Kg N ₂ O per koe per jaar door uitrijden mest		0,0273			1,815 – 2,904 ²		1,452	1,82

¹ : Berekend n.a.v. percentage ² : Range

In Tabel 6 zijn gegevens te vinden voor de lachgasemissie op het mesttraject. Ook hier wordt bron 3 genegeerd om de voornoemde redenen.

Er vindt geen lachgasemissie plaats vanuit de koe. De resterende waarden zijn allen vrij klein en de verschillen tussen de waarden zijn groot. Wel is het global warming potential van lachgas erg groot, dus het effect van de cijfers op broeikasgasemissie in CO₂-equivalenten is groot. Vaak wordt aangegeven dat metingen voor lachgas moeilijk te doen zijn. Dit zal een reden zijn voor de verschillen in de gevonden waarden. Representatieve waarden worden weergegeven in de laatste kolom van Tabel 6, onder repr.

Kg N₂O per koe per jaar door mestopslag:

Drie waarden zijn overeenkomend, namelijk 0,145. De drie overgebleven waarden zijn minimaal een factor twintig kleiner, waarbij bron 1 aangeeft dat er geen emissie van N₂O gevonden is. De drie overeenkomende waarden zijn berekend aan de hand van een percentage in combinatie met gegevens van het standaardbedrijf. Dit betekent niet dat ze meer betrouwbaar zijn, maar aangenomen wordt dat ze beter bij de onderzochte situatie passen. Daarom wordt de waarde van 0,15 kg N₂O per koe per jaar aangenomen voor emissie uit mestopslag.

Kg N₂O per koe per jaar door mest in overdekte buitenopslag:

Hiervoor zijn twee waarden gevonden. Bron 7 geeft een emissie van 0, terwijl bron 8 een emissie van 0,0187 geeft. Als we ervan uit gaan dat in de kelder lachgas ontstaat, zal dit ook in de buitenopslag gebeuren. Dan zal er net als bij ammoniak ondanks de afdekking toch lachgas weglekken, maar door de afdekking zal dit minder zijn dan uit de kelder. Aangenomen wordt dat 0,019 kg N₂O per koe per jaar uit de buitenopslag ontsnapt.

Kg N₂O per koe per jaar door beweiden:

Alle waarden voor emissie door beweiden zijn berekend aan de hand van percentages. 2 waarden zijn gelijk, terwijl de derde waarde 3 maal zo hoog is. De hoge waarde is afkomstig van bron 10 (Hees *et al.*, 2007). Dit onderzoek gebruikt getallen uit andere onderzoeken voor berekeningen voor een totaal gebied. Daarom worden de twee gelijke waarden als meer betrouwbaar geacht en wordt 0,69 gebruikt als emissiefactor voor beweiding.

Kg N₂O per koe per jaar door uitrijden mest:

De gegevens voor uitrijden van mest komen niet met elkaar overeen. In bron 7 wordt een range gegeven, waar beide andere waarden (ver) onder liggen. Wat de reden hiervan is, is onduidelijk. Daarom wordt als waarde voor emissie van lachgas bij uitrijden de laagste waarde van de range genomen, dus 1,82 kg N₂O per koe per jaar.

Totaal kg N₂O per koe per jaar:

Er is één waarde gevonden voor de totale lachgasemissie, namelijk 5,37 kg. Sommatie van hierboven aangenomen waarden geeft een totaal van 2,68 kg. Dit is beduidend lager. Dit kan erop wijzen dat één of meerdere van bovenstaande aannames niet juist is, maar om overeenkomende waarden te houden, wordt de sommatie van aangenomen waarden gebruikt. Dat maakt dus een totaal van 2,68 kg N₂O per koe per jaar.

CO₂ Koolstofdioxide

Emissie van CO₂ ontstaat gedurende het gehele traject in enige mate. Ook is CO₂-emissie het gevolg van verbranding van fossiele brandstoffen.

Tabel 7: Een overzicht van koolstofdioxide-emissie zoals gevonden in literatuur, omgerekend naar het aantal kg CO₂ per koe per jaar

CO ₂ -emissie	Bronnen			
	1	3	7	Repr.
Totaal kg CO ₂ per koe per jaar door koe	3997			4000
Kg CO ₂ per koe per jaar door mestopslag	1478	1915		1500
Kg CO ₂ per koe per jaar door buitenopslag				150
Kg CO ₂ per koe per jaar door homogenisatie mest		4,47		
Kg CO ₂ per koe per jaar door mesttoediening		25	Zodebemester 81,9	81,9
			Sleepvoetbem. 63	63
			Mestinj.Grasl. 117,6	117,6
			Mestinj.Bouwl. 81,9	81,9
Totale emissie per koe per jaar (bemestingsmethode= zodebemester)				5732

In Tabel 7 zijn gegevens voor emissie van CO₂ weergegeven. De waarden uit bron 3 worden genegeerd om voornoemde redenen. Gezien het GWP van CO₂ van 1, is de invloed van deze getallen op de totale broeikasgasemissie klein en is de gevoeligheid laag. Afronden van waarden zal geen merkbaar effect hebben.

Voor de emissie van CO₂ vanuit de koe is één waarde gevonden, namelijk 3997 kg. Hiervoor wordt 4000 kg per koe per jaar aangenomen.

Voor emissie van CO₂ vanuit de mestopslag wordt de overgebleven waarde van 1478 afgerond meegenomen, zodat de emissie 1500 kg CO₂ per koe per jaar is. Voor de buitenopslag is geen waarde gevonden, maar bij de andere gassen ligt emissie uit de buitenopslag tussen 6 en 13% van emissie uit de mestkelder. Als hier 10% genomen wordt is de emissie uit de afgedekte mestopslag 150 kg CO₂ per koe per jaar.

De CO₂ emissie door uitrijden van de mest is afhankelijk van de gebruikte methode. Voor zodebemesting, sleepvoetbemesting en mestinjectie op grasland zijn de waarden respectievelijk 81,9, 63 en 117,6 kg CO₂ per koe per jaar. Voor mestinjectie op bouwland is de emissie 81,9 kg CO₂ per koe per jaar.

Voor de totale CO₂-emissie per koe per jaar wordt de som van de hierboven gevonden waarden genomen, waarbij wordt aangenomen dat zodebemesting als bemestingsmethode wordt gebruikt..

Totale broeikasgasemissie in CO₂-equivalenten

Thomassen *et al.*, (2008a), Vellinga *et al.* (2009) en Mol *et al.* (2003) geven ook waarden voor de totale broeikasgasemissie van een Nederlands melkveebedrijf. Ook wordt de bijdrage daaraan door methaan, lachgas en koolstofdioxide vermeld. In Tabel 8 zijn de waarden uit deze drie bronnen weergegeven.

Uit de waarden gevonden in tabellen 5 tot en met 7 is ook een totale broeikasgasemissie in kg CO₂-equivalenten te berekenen voor het mesttraject. En wel door de representatieve waarden te vermenigvuldigen met het Global Warming Potential, zoals te vinden in Tabel 2. In Tabel 9 is de broeikasgasemissie weergegeven en de respectievelijke bijdrage in procenten daaraan door methaan, lachgas en koolstofdioxide.

Tabel 8: Een overzicht van de totale hoeveelheid broeikasgasemissie in CO₂-equivalenten per kg melk en de procentuele bijdrage van de afzonderlijke gassen over het gehele melkveebedrijf

Emissie CO ₂ -equivalenten [kg per kg melk]	Bronnen		
	2	5	7
Totaal kg per kg melk	1,4	1,060	1-1,5
Bijdrage methaan	34%	50%	38%
Range methaan		41-65%	
Bijdrage koolstofdioxide	29%	30%	31%
Range CO ₂		25-40%	
Bijdrage lachgas	38%	20%	31%
Range lachgas		10-65%	

Voor een vergelijking van de broeikasgasemissie gevonden in Tabel 9 met de waarden in Tabel 8, dient de emissie in kg per koe per jaar te worden omgerekend naar kg per kg melk per jaar. Daarvoor wordt een productie van 7800 kg melk per koe per jaar genomen, zoals in Tabel 1 is aangegeven. De resulterende waarde is weergegeven in Tabel 9.

Tabel 9: Totale broeikasgasemissie van het mesttraject berekend uit waarden gevonden in tabellen 5 tot en met 7 en de bijdrage van de afzonderlijke gassen in procenten

	%CH ₄	%N ₂ O	%CO ₂	CO ₂ -equiv. [kg · koe ⁻¹ · jaar ⁻¹]	CO ₂ -equiv. [kg · kg melk ⁻¹]
Emissie vanuit koe	39,6	0	60,4	6625	0,85
Emissie door mestopslag in mestkelder	35,2	1,9	62,9	2387	0,31
Emissie door mestopslag in afged.buitenopslag	25,2	2,8	72,0	208	0,03
Emissie door beweiding	0	100	0	214	0,03
Emissie door uitrijden mest (zodebemesting)	6,1	82,0	11,9	688	0,09
Totale emissie per koe per jaar (zodebemesting)	35,2	8,2	56,6	10133	1,30

Als de berekende CO₂-equivalenten per kg melk worden vergeleken met de gevonden waarden zoals weergegeven in Tabel 8, is te zien dat de totale emissie met 1,30 kg wel van eenzelfde grote is. Maar de waarde is wel vrij hoog, helemaal als er een vergelijking met Figuur 3 plaatsvindt. Daar is weergegeven wat de bronnen van de emissie zijn. Als de emissies uit de figuur die aan het mesttraject kunnen worden toegeschreven, worden opgeteld, geeft dat bij benadering een waarde van 0,55 kg CO₂-equivalenten per kg melk van totaal 1,06. Een reden hiervoor is dat veelal de CO₂-productie van de koe zelf niet wordt meegerekend. Verwaarlozing van deze waarde vermindert de totale emissie met $4000/7800 = 0,52$, tot 0,79 kg CO₂-equivalenten. Dat lijkt een vrij reële waarde te zijn.

2.5. Emissie van Ammoniak: resultaten en discussie

Er is emissie van ammoniak op het traject van de mest op vier momenten: vanuit mest in de stal, vanuit mest in de kelder/buitenopslag, tijdens beweiding en tijdens uitrijden van (kunst)mest.

In Tabel 10 zijn gegevens samengebracht, samengesteld vanuit verschillende bronnen en omgerekend naar het aantal kg ammoniak per koe per jaar. De waarden zoals die in de literatuur zijn terug te vinden en de omrekeningswijze, zijn weergegeven in een tabel in bijlage II.

Tabel 10: Waarden van ammoniakemissie op het melkveebedrijf als gevolg van mest verdeeld over verschillende bronnen

NH ₃ -emissie		Bronnen				
		3	7	8	10	Repr.
Totaal kg NH ₃ / koe / jaar	<i>Zodebemester gras</i>	5,9				23,8
	<i>Sleepvoetbem. gras</i>					43,8
	<i>Mestinjectie gras</i>					13,1
	<i>Direct inwerken bouw.</i>					25,3
	<i>Mestinjectie bouw.</i>					23,4
	<i>Volledig bedekken bouw.</i>					13,0
Het aantal kg NH ₃ / koe / jaar uit mestkelder			7,83	10,56 13,15 ¹		10
Het aantal kg NH ₃ / koe / jaar uit de afgedekte buitenopslag		0,474	0,59	0,64 0,51 ¹		0,6
Het aantal kg NH ₃ / koe / jaar door beweiding			1,17	1,2		1,2
Het aantal kg NH ₃ / koe / jaar door toediening van drijfmest	<i>Zodebemester gras</i>	3,9	12,9	11,6		12
	<i>Sleepvoetbem. gras</i>		32,3	15,9		32
	<i>Mestinjectie gras</i>		1,29			1,3
	<i>Direct inwerken bouw.</i>			13,5		13,5
	<i>Mestinjectie bouw.</i>		11,6			11,6
	<i>Volledig bedekken bouw.</i>			1,22		1,2
Emissie N uit N kunstmest					10%	

¹: Waarde op basis van TAN in mest

Voor de waarden in

Tabel 10 moet ook een representatieve waarde vinden worden. De laatste kolom, onder Repr. bevat deze waarden. Ook voor ammoniak wordt bron 3 om genoemde redenen genegeerd, zodat bron 7 en 8 overblijven. Deze waarden komen meestal goed overeen. Daarom wordt als de waarden overeenkomen een afgerond gemiddelde als emissiefactor aangenomen.

Kg NH₃ per koe per jaar door mestopslag:

Het gemiddelde van de drie waarden voor emissie uit de mestkelder is afgerond 10 kg CO₂ per koe per jaar. Voor de buitenopslag is dit 0,6 kg.

Kg NH₃ per koe per jaar door beweiden:

Het afgerond gemiddelde van twee waarden is 1,2 kg CO₂ per koe per jaar door beweiden.

Kg NH₃ per koe per jaar door uitrijden mest:

De ammoniakemissie is afhankelijk van de gebruikte techniek. Voor zodebemesting op gras komen de waarden goed overeen wordt een afgerond gemiddelde aangenomen, zodat emissie 12 kg ammoniak per dier per jaar is. Voor sleepvoetbemesting geven de twee bronnen sterk verschillende waarden, waarbij de waarde van bron 7 tweemaal hoger is dan de waarde van bron 8. Aangezien deze laatste slechts iets hoger is dan de waarde voor de zodebemester, terwijl de zodebemester in de praktijk een stuk beter emissiereducerend is, wordt de waarde van bron 7 meegenomen, zodat emissie door de sleepvoetbemester op 32 kg ammoniak komt. Waarden voor mestinjectie op gras, direct inwerken, mestinjectie en volledig bedekken op bouwland zijn eenmalig gevonden en zijn respectievelijk 1,3, 13,5, 11,6 en 1,2 kg NH₃ per koe per jaar.

Voor de totale ammoniakemissie per koe per jaar wordt de som van de hierboven gevonden waarden genomen.

2.6. Effectiviteit van drijfmest als meststof

Drijfmest is geen ideale meststof. Het is moeilijk om er bij bemesting met drijfmest voor te zorgen dat zo min mogelijk nutriënten verdwijnen door gasvormige emissie of door

uitspoelen. Het hoge drogestof- en koolstofgehalte van de mest in vergelijking met kunstmest, zorgt voor diverse problemen tijdens opslag en toepassing van drijfmest.

Problemen die optreden tijdens opslag van drijfmest zijn korstvorming en neerslaan van vaste delen in de mest. Daarom is regelmatig pompen en mixen noodzakelijk, in ieder geval als de mest uitgereden moet worden. Dit kost een redelijk hoeveelheid energie. Het energieverbruik bij pompen en mixen voor homogenisatie ligt rond 0,91 kWh/m³ mest.

Tijdens het uitrijden van de mest doen zich ook een aantal problemen voor.

Ammoniakemissies treden op tijdens en na uitrijden. Het kost veel moeite om gelijkmatig uit te rijden, door de onregelmatige structuur van drijfmest. Emissiearm uitrijden kost extra trekkracht en dus energie. Daarnaast kunnen planten als gevolg van drijfmest beschadigen. Er kan verbranding optreden. Drijfmest is als meststof bij veel granen vrijwel onbruikbaar (Zwart *et al.*, 2006).

De effectiviteit van drijfmest als meststof is een stuk lager dan de effectiviteit van kunstmest. Dit heeft te maken met de relatieve onvoorspelbaarheid van de werking van drijfmest. De ammoniakale stikstoffen zullen snel beschikbaar zijn voor planten, maar lopen ook het risico gebonden te worden. De stikstof in de drijfmest die organisch gebonden is komt vrij op een onvoorspelbaar tijdstip, dit zorgt wel voor een langere werking, maar misschien niet op het moment dat dit nodig is. Als gevolg van denitrificatie van stikstof treden lachgasemissies op (Amon *et al.*, 2006).

Daarnaast is in drijfmest de verhouding tussen de aanwezige nutriënten in de mest niet gelijk aan de verhouding van nutriënten die het gewas nodig heeft. Veelal is er teveel fosfaat aanwezig in verhouding tot stikstof, zodat fosfaat beperkend is voor de maximum hoeveelheid toe te dienen drijfmest, terwijl er op dat moment nog wel ruimte is voor stikstof.

2.7. Conclusie

In paragraaf 2.3 is aangegeven dat voor de samenstelling van drijfmest de gemiddelde waarden uit Tabel 3 kunnen worden aangehouden, met afwijkend daarvan, voor de dichtheid van drijfmest 1000 kg per ton. In Tabel 11 is weergegeven wat op basis hiervan de inhoud van drijfmest is.

Tabel 11: De samenstelling van drijfmest

	Eenheid is in kg/ton drijfmest
N-totaal	4,4
N-organisch	2,1
Totaal Ammoniakaal N	2,4
P ₂ O ₅	1,5
K ₂ O	6,4
Drogestof	86,8
Organische stof (OS)	63,0
Effectieve OS	31,0
C/N-ratio	9,1
Water	905
Dichtheid	1000

Feces en urine samenvoegen tot drijfmest, zoals in de Nederlandse melkveehouderij algemeen wordt gedaan, resulteert in emissie van gassen die een negatief effect hebben op de omgeving. Emissie van broeikasgassen draagt bij aan het versterkte broeikas effect, terwijl emissie van ammoniak resulteert in verzuring en vermisting van water en bodems. De bijdrage van de melkveehouderij aan de totale emissie van deze stoffen is groot.

Voor het mesttraject bedraagt de gevonden broeikasgasemissie per koe per jaar 10133 kg CO₂-equivalenten. De procentuele bijdrage van de drie broeikasgassen is als volgt: 35% vanwege CH₄, 8% vanwege N₂O en 57% vanwege CO₂ (Zie Tabel 9).

Voor de bijdragen per bron zijn de volgende waarden gevonden: Emissie vanuit de koe zelf levert de grootste bijdrage van 65,4%. Ook mestopslag in de mestkelder levert een grote bijdrage van 23,6%. De bijdrage aan emissie door uitrijden van drijfmest is 6,8%. Bij gebruik van een andere methode van mest uitrijden zal deze waarde licht hoger of lager worden. De bijdrage vanuit de afgedekte buitenopslag is gelijk aan de bijdrage van beweiding en bedraagt 2,1%. Zie ook Tabel 12.

Tabel 12: Bijdrage per bron aan totale broeikasgasemissie

	CO ₂ -equiv. [kg · koe ⁻¹ · jaar ⁻¹]	Bijdrage aan CO ₂ - equiv. uit bronnen in %	NH ₃ -em. [kg · koe ⁻¹ · jaar ⁻¹]	Bijdrage aan NH ₃ -em. in %
Emissie vanuit koe	6625	65,4	0	0
Emissie door mestopslag in mestkelder	2387	23,6	10	42,0
Emissie door mestopslag in afged.buitenopslag	208	2,1	0,6	2,5
Emissie door beweiding	214	2,1	1,2	5,0
Emissie door uitrijden mest (zodebemesting)	688	6,8	12	50,4
Totale emissie per koe per jaar (zodebemesting)	10133	100	23,8	100

Voor de emissie van ammoniak in kg NH₃ per koe per jaar, is de uitkomst sterk afhankelijk van de methode van uitrijden. In Tabel 12 is de emissie weergegeven als er uitgereden wordt door middel van zodebemesting. In dat geval bedraagt de bijdrage door uitrijden 50,4% van de totale NH₃-emissie. De bijdrage die daarop volgt in grootte is de emissie vanuit de mestkelder, die 42% uitmaakt van het totaal. Emissie door beweiden is relatief weinig, met een bijdrage van 5% en uit de afgedekte buitenopslag emitteert slechts 2,5% van het totaal. De bijdrage door uitrijden kan zowel fors hoger zijn, als fors lager, afhankelijk van de methode. Hoe emissie-arter wordt uitgereden, hoe lager de bijdrage, waarbij zodebemesting de middenpositie inneemt. Vergelijk hiervoor Tabel 10.

De effectiviteit van drijfmest als meststof is moeilijk te kwantificeren, maar is zeker niet ideaal. Naast dat de bemestende waarde van drijfmest wisselend is, sluit de verhouding van nutriënten in drijfmest vaak niet aan op de behoeften van het gewas. Verder is moeilijk te bepalen wanneer de nutriënten beschikbaar komen, doordat een deel organisch gebonden is. Gebruik van drijfmest resulteert in emissie van schadelijke stoffen.

3. Anaerobe vergisting en co-vergisting drijfmest

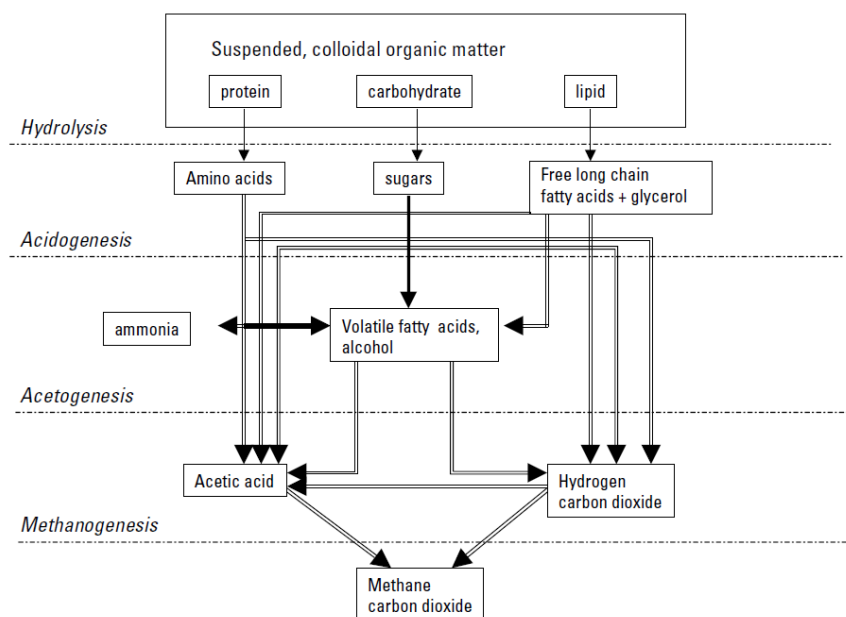
Dit hoofdstuk gaat over het effect van anaerobe vergisting van drijfmest al dan niet in combinatie met co-producten, op de samenstelling van de mest, de grootte van de emissies die optreden gedurende het mesttraject, de bijdragen per bron en de effectiviteit van digestaat als meststof.

3.1. Anaerobe Vergisting

Anaerobe vergisting is een proces waarbij bacteriën organisch materiaal in een zuurstofloze omgeving afbreken om daar zelf energie uit te halen voor groei. Het treedt van nature op in mest en andere producten waarin zich organisch materiaal bevindt. Het proces bestaat uit vier opeenvolgende stappen, waarbij elke stap zijn eigen bacteriesoorten heeft.

- Hydrolyse: Het omzetten van onoplosbare organische polymeren naar oplosbare organische verbindingen;
- Acidogenese: Het omzetten van deze oplosbare organische verbindingen in vluchtige vetzuren en koolstofdioxide;
- Acetogenese: Het omzetten van vluchtige vetzuren naar acetaat/ethanoaat (CH_3COO^-) en waterstofgas (H_2);
- Methanogenese: Conversie van acetaat en CO_2 of H_2 en CO_2 tot methaangas (CH_4).

Het is belangrijk dat tijdens het proces de verschillende fasen min of meer in evenwicht blijven, zodat geen deelproducten zich ophopen. Ophoping kan resulteren in lagere pH-waarden, wat een remming geeft op de belangrijkste stap, de methanogenese. Figuur 4 bevat een schema waarin dit proces vereenvoudigd is weergegeven.



Figuur 4: Schema van het anaerobe vergistingsproces (Mes et al., 2003)

Mestvergisting kan gedaan worden op verschillende temperatuurniveaus, elk met eigen kenmerken.

- Vergisting bij temperaturen tussen 10°C en 20°C wordt psychrofiële vergisting genoemd. Hoe lager de temperatuur, hoe langzamer het vergistingsproces. Voor dit type vergisting is een grote vergister nodig;
- Vergisting bij temperaturen tussen 20°C en 40°C wordt mesofiële vergisting genoemd. De ideale temperatuur (hoogste bacteriële activiteit) is 35°C ;

- Vergisting bij temperaturen tussen 50°C en 60°C wordt thermofiele vergisting genoemd. De ideale temperatuur is 55°C. Deze manier van vergisting is ideaal als de temperatuur van de afvalstroom al hoog is.

Anaerobe vergisting is een proces dat gevoelig is voor de pH van de producten. De laatste en belangrijkste stap van methaanproductie vindt plaats bij pH-waarden van 6,5 tot 7,5. Afwijking van deze pH beïnvloedt de opbrengst van methaan negatief. Verandering van pH kan ook optreden door ophoping of overproductie van stoffen in één van de genoemde stappen.

Er zijn verschillende typen anaerobe vergisters. Welk type gebruikt wordt is afhankelijk van de samenstelling van het te vergisten product. Als de concentratie van vaste delen in de oplossing klein is, zijn er systemen met een korte hydraulische retentietijd. Deze worden high-rate systemen genoemd.

Voorbeelden hiervan zijn:

- Contact process reactoren;
- Anaerobische filters;
- Fluidised bed reactoren;
- Upflow anaerobic sludge bed reactoren (UASB).

Mest valt onder de afvalstromen met een total solids-concentratie (TS) hoger dan 30%. Hiervoor is een langere hydraulische retentietijd nodig en de systemen worden daarom low-rate genoemd. De meest gebruikte low-rate systemen zijn:

- Batch reactoren: De vergister wordt in het begin van het proces compleet gevuld. Na verloop van tijd wordt de vergister in één keer geleegd, waarbij zo'n 15% van de overblijfselen van het vorige proces dienen als inoculum voor de volgende batch. Dit eenmalig vullen betekent dat er een voor- en een na-opslagtank nodig zijn;
- Accumulatie-reactoren: De vergister wordt continu gevoed, wat betekent dat het volume toeneemt met de tijd. Als de vergister vol is wordt hij geleegd, waarbij weer 15% achterblijft. Dit systeem is het eenvoudigste vergistingssysteem;
- Propstroom-reactor: Deze vergister kan gezien worden als een horizontale pijp, waar aan één zijde met regelmaat substraat wordt ingevoerd. Aan de andere zijde verlaat eenzelfde hoeveelheid digestaat de vergister. Er kan gebruik worden gemaakt van verticaal mixen om drijfslagen of korstvorming tegen te gaan. De vier verschillende stappen van het vergistingsproces zijn verdeeld over de lengte van de vergister, zodat methaanvorming aan het eind van de vergister plaats vindt;
- Continuously stirred tank reactors (CSTR): Deze vergister heeft een continue aanvoer en afvoer van substraat en wordt continue geroerd, zodat concentraties in de gehele reactor gelijk zijn.

Naast low- en high-rate systemen zijn er ook multi-stage systemen, waarbij meerdere (verschillende) reactoren achter elkaar geplaatst worden. Een voorbeeld is de two-phase-vergister, waarbij in de eerste CSTR de omstandigheden ideaal zijn voor hydrolyse en in de tweede CSTR voor methanogenese (Mes *et al.*, 2003; Demirer *et al.*, 2005).

Anaerobe vergisting heeft een aantal voordelen (Mes *et al.*, 2003; Demirer *et al.*, 2005; Boer *et al.*, 2008):

- Er vindt productie van methaan plaats, dat als energiebron kan dienen;
- Anaerobe processen verbruiken meestal weinig energie. Afhankelijk van hoeveel er gepompt moet worden ligt het energieverbruik tussen 0,05-0,1 kWh/m³ (0,18-0,36 MJ/m³);
- De hoeveelheid vaste stof wordt teruggebracht;

- Het eindproduct is bijna geurvrij;
- Vrijwel alle nutriënten voor bemesting (stikstof, N, fosfaat, P en kalium, K) komen in het eindproduct terecht;
- Moderne anaerobe technieken kunnen hoge ladingen aan;
- Het proces kan een tijdlang zonder nieuwe input (snel herstel);
- Kosten en het ruimtegebruik van de installatie zijn relatief laag.

De nadelen van het anaerobe proces zijn:

- De methanogene bacteriën zijn erg gevoelig voor bepaalde chemische componenten waaronder ammoniak;
- Anaerobe bacteriën groeien langzaam, dus het opstarten van een installatie zonder enten van bacteriën kost veel tijd;
- Als er zich in de input componenten met zwavel bevinden kan dit resulteren in geuremissie door vorming van sulfide. Dit kan worden nabehandeld met een stap waarbij de sulfide tot sulfaat wordt omgezet.

Het gas dat ontstaat tijdens anaerobe vergisting van organisch materiaal wordt biogas genoemd. Het is een mengsel van een aantal gassen en de samenstelling is wisselend (BiogaS, 2009)). Mes *et al.* (2003) geven ranges voor de samenstelling van biogas. Deze zijn weergegeven in Tabel 13. Andere gevonden waarden vallen daarbinnen.

Tabel 13: Samenstelling van biogas afkomstig van anaerobe vergisting (Mes *et al.*, 2003)

Aanwezige gassen	Range	Eenheid
Methaan (CH ₄)	45 – 75	%
Koolstofdioxide (CO ₂)	24 – 45	%
Waterstofsulfide (H ₂ S)	0 – 1,5	%
Ammoniak (NH ₃)	0 – 0,05	%
Stikstof (N ₂)	< 2	%
Waterstof (H ₂)	< 1	%
Waterdamp (H ₂ O)	Verzadigd	
Overig	Miniem	
Energiewaarde	20 – 25	MJ · m ⁻³

De gasopbrengst in m³ per m³ substraat is afhankelijk van zowel het substraat als van de vergister en de proceseigenschappen. De verteerbaarheid en concentratie van het organisch materiaal (complexiteit), de retentietijd, de procestemperatuur en de kinetische eigenschappen van het proces hebben allemaal invloed op de opbrengst (Mes *et al.*, 2003; Timmerman *et al.*, 2005). Dit betekent dat de opbrengst van een proces moeilijk te berekenen of te schatten is. Opbrengsten uit de praktijk liggen voor dierlijke mest tussen 80 en 200 m³ biogas per ton organische stof of tussen 2 en 45 m³ per m³ invoer.

Het percentage methaan bepaalt de energiewaarde van het biogas. Puur methaan heeft een hogere verbrandingswaarde (HHV) van 39,8 MJ · Nm⁻³. Biogas met 62% CH₄ heeft een HHV van 24,7 MJ · m⁻³ en met 55% CH₄ is de verbrandingswaarde 22,0 MJ · m⁻³ (Zwart *et al.*, 2006). Biogas is verzadigd met waterdamp. Als dit niet door condensatie verwijderd wordt, zal dit de verbrandingswaarde omlaag brengen, dichter naar de lower heating value (LHV).

Er zijn diverse manieren om biogas te verwaarden:

- Voor mestvergisting op boerderijschaal is het meest gebruikelijk om het biogas door middel van een warmtekrachtkoppeling (WKK) om te zetten in elektriciteit en warmte. Voordat het biogas verbrand wordt, dient het gas van waterstofsulfide gereinigd te worden. H₂S kan namelijk voor corrosie zorgen. Dit ontzwavelen gebeurt door toevoeging van lucht, waardoor H₂S neerslaat als zwavel (Timmerman *et al.*, 2005). Vermogens van WKK kunnen uiteenlopen van tientallen kilowatts tot enkele

- megawatts. Het elektrisch rendement ligt tussen 29 en 38%, waarbij grotere motoren en motoren die diesel mee verbranden, efficiënter zijn. Het thermisch rendement van de WKK is maximaal 55%, maar een groot deel van de warmte is nodig om de vergister op temperatuur te houden (Nijssen *et al.*, 1997). Mes *et al.* (2003) geven aan dat tussen 20 en 50% van de energie uit het biogas nodig is om de vergister op gang te houden. Naast warmte voor de vergister is hier ook elektrische energie voor pompen en mixen bij gerekend. Zo'n 15% van de energie uit biogas gaat verloren;
- Biogas kan ook worden omgezet in elektriciteit en warmte door middel van een brandstofcel. Het gas dient hiervoor echter vrij te zijn van vervuilingen. De reactie in een brandstofcel is chemisch in plaats van explosief en daarom heeft dit een hoger elektrisch rendement, van maximaal 55%. In de praktijk is het rendement 41%. Het thermisch rendement is ongeveer 35%. Als het nodig is kan het thermisch rendement verhoogd worden ten koste van het elektrisch rendement;
 - Een laatste optie is het opwerken van biogas naar aardgaskwaliteit, zodat het aan het aardgasnet geleverd kan worden of gebruikt als autogas. Het gas dient vrijwel vrij te zijn van vervuiling en het methaangehalte moet omhoog worden gebracht naar 97%, zodat een verbrandingswaarde van 30 – 34 MJ·m⁻³ wordt bereikt. Verder moet het gas bij levering aan het aardgasnet op druk gebracht worden en moet er een geurspoor worden toegevoegd. Levering aan het net gebeurt wel algemeen met opgewaardeerd stortgas opgewekt uit afvalstromen (Nijssen *et al.*, 1997; Mes *et al.*, 2003).

3.2. Vergisting van mest en co-vergisting

Anaerobe vergisting wordt in de veehouderij ook gebruikt, waarbij drijfmest als substraat dient. Op deze manier kan er uit een bijproduct nuttige elektrische- en warmte-energie worden gewonnen. Het CBS geeft aan dat in 2008 er 78 landbouwbedrijven waren met een elektriciteit producerende mestvergister. Ongeveer 1% van de in Nederland geproduceerde dierlijke mest wordt vergist (CBS, 2009). In Tabel 14 is weergegeven welke producten en hoeveelheden in de jaren 2006 tot 2008 op landbouwbedrijven werden vergist. Het absolute gebruik in ton van zowel de drie meststromen als van de twee co-substraat-stromen is toegenomen.

Tabel 14: Gegevens met betrekking tot het absolute gewicht en het aandeel dat drie stromen van mest en twee stromen co-producten hadden bij co-vergisting in biogasininstallaties in de landbouw (CBS, 2009)

		2006	2007	2008
Mest				
Rundveemest	[%]	51	32	30
Varkensmest	[%]	48	52	65
Overig/onbekend	[%]	1	16	5
<i>Totaal</i>	[%]	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>
Totaal gewicht [miljoen ton]		0,2	0,4	0,9
Co-substraten				
Maïs	[%]	67	39	44
Overig	[%]	33	61	56
<i>Totaal</i>	[%]	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>
Totaal gewicht [miljoen ton]		0,1	0,3	0,5

Het is mogelijk om drijfmest alleen te vergisten, maar drijfmest heeft een lage energie-inhoud. De concentraties drogestof en organische stof zijn relatief laag en daardoor is dus de opbrengst in m³ biogas per m³ vergisterinhoud of per m³ drijfmest ook laag. Tabel 15 geeft een biogasopbrengst van 0,30 m³ per kg organische stof voor rundveedrijfmest (Timmerman

et al., 2005). Als dat wordt vermenigvuldigd met een organische stof gehalte van 63 kg per ton drijfmest, zoals weergegeven in Tabel 3, geeft dat een biogasproductie van ongeveer 19 m³ per ton rundveedrijfmest. Mes *et al.* (2003) geeft een vergelijkbare waarde van 20 m³ per ton.

Daarnaast is de biologische afbreekbaarheid van koemest ook nog eens lager dan van bijvoorbeeld varkensmest. Door het efficiënte verteringsstelsel van de koe zijn minder makkelijk afbreekbare organische verbindingen aanwezig. Dit betekent dat rundveemest minder aantrekkelijk is om alleen te vergisten dan varkensmest (Mes *et al.*, 2003). Voor beperking van emissie van broeikasgassen is het wel verstandig om alleen mest in de vergister te verwerken (Zwart *et al.*, 2006). Veel bronnen geven echter aan dat vergisting van alleen (runder)drijfmest in ieder geval economisch niet rendabel is. Om mestvergisting economisch rendabel te maken is toevoeging van andere producten nodig. Dit wordt co-vergisting genoemd (Mes *et al.*, 2003; Zwart *et al.*, 2006; Boer *et al.*, 2008).

Tabel 15: Gasopbrengsten bij anaerobe vergisting (Timmerman *et al.*, 2005)

	Methaanopbrengst [m ³ / kg OS]	Biogasopbrengst [m ³ / kg OS]
Rundveedrijfmest	0,17	0,30
Snijmaïskuil	0,40	0,70
Rundveedrijfmest en Snijmaïskuil	0,29	0,53

Door co-vergisting wordt de gasopbrengst sterk verhoogd, zowel per m³ substraat als per kg organische stof. Allerlei organisch materiaal kan als co-product worden toegevoegd: gras, GFT-afval, voerresten, maar ook slachtafval of frituurvet (Nijssen *et al.*, 1997).

Gezien de veelheid van mogelijke co-producten heeft het ministerie van LNV een positieve lijst met producten die wettelijk mogen worden gebruikt, opgesteld. Dit heeft tot doel te voorkomen dat er verontreinigingen of milieugevaarlijke stoffen in het digestaat en uiteindelijk op het land terecht komen. Daarnaast zijn er ook regels opgesteld voor het maximale aandeel co-product: minimaal 50% van de input moet bestaan uit dierlijke mest en dus mag maximaal 50% van het substraat uit co-producten bestaan om het digestaat dierlijke mest te mogen noemen en het zo te mogen verhandelen (Boer, 2004; LNV, 2008).

Uit Tabel 14 blijkt dat maïs bijna de helft van gebruikte co-producten uitmaakt, hoewel het aandeel maïs aan het afnemen is ten opzichte van overige co-substraten. De energie-inhoud van maïs is ongeveer 9 maal zo groot als van mest en Tabel 16 laat het effect van toevoeging van maïs op de biogasopbrengst zien. Duidelijk is dat de stap van 0 naar 25% maïs de grootste stijging oplevert. Andere co-producten zullen een vergelijkbaar effect hebben, hoewel de grootte van het effect afhankelijk is van de samenstelling van het co-product.

Tabel 16: Effect van de mengverhouding van mest en maïs op de energieproductie (Zwart *et al.*, 2006)

% Dunne Rundveemest	% Snijmaïs	Nuttige energie (GJ·1000)
100	0	1,3
75	25	7,4
50	50	8,8
25	75	9,4
0	100	9,8

Timmerman *et al.* (2005) geven aan dat er streefwaarden zijn voor de hoeveelheid droge stof per kuub te vergisten mest. In Duitsland wordt gestreefd naar 2,5 kg drogestof per m³ vergisterinhoud per dag. Om deze waarde te bereiken kan gestuurd worden met de toe te voegen hoeveelheid co-producten.

Zwart *et al.* (2006) maken de volgende twee concluderende opmerkingen met betrekking tot vergisting van mest en co-producten:

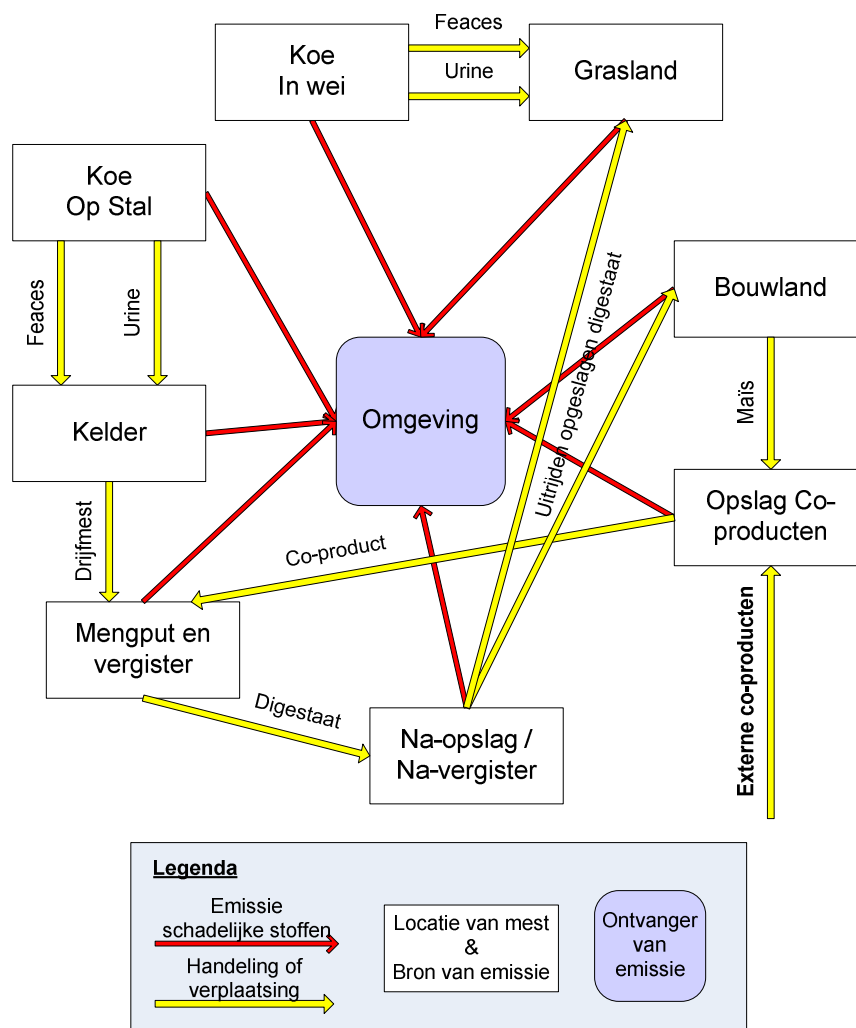
- Voor beperking van de emissie van broeikasgassen is het verstandig om alleen mest in de vergister te verwerken;
- Voor het winnen van zoveel mogelijk energie uit biomassa is het verstandig om geen mest in de vergister te verwerken maar alleen andere biomassa.

Deze twee opmerkingen lijken elkaar te bijten en doen dat in feite ook. Bij vergisting van mest moet altijd een afweging worden gemaakt tussen verschillende doelen. Bij vergisting van mest alleen wordt de sterkste emissiereductie voor broeikasgas bereikt, maar de gasopbrengsten zijn vrij laag en dus staat de rendabiliteit onder druk. Gebruik van co-producten zal gasopbrengst en rendabiliteit verhogen, maar ook de emissies. En uiteindelijk is mestvergisting een manier om uit het afvalproduct mest bruikbare energie te winnen, dus is vergisten zonder mest in de praktijk geen optie.

3.3. Mesttraject op het melkveebedrijf bij mestvergisting

Vergelijkbaar met

Figuur 2 kan ook een schematische weergave worden gemaakt van het mesttraject op een melkveehouderij waar vergisting van drijfmest en co-producten plaatsvindt. In Figuur 5 is dit schema weergegeven.



Figuur 5: Het mesttraject op een melkveebedrijf als er sprake is van mest- en co-vergisting

Er zijn in vergelijking met Figuur 2 meer bronnen van emissie aanwezig. De basis is nog steeds de koe, die of geweid wordt of is opgesteld, maar ook verbouw van co-producten en opslag daarvan worden nu bij het mesttraject gerekend. Als externe co-producten worden geleverd, moeten deze worden opgeslagen en ook deze opgeslagen co-producten kunnen een bron zijn van emissie van broeikasgassen en ammoniak.

Mestvergisting kan met verschillende opstellingen gedaan worden. Hier is gekozen voor een CSTR. Aangezien mest maar een deel van het jaar uitgereden mag worden en een vergister een bepaalde retentietijd heeft, is een na-opslag die ook als na-vergister gebruikt kan worden, nodig. Er wordt uitgegaan van het opvangen van mest in de mestkelder, waar vandaan het zo snel mogelijk moet worden doorgepompt naar de vergister. Hoe langer mest buiten de vergister blijft, hoe meer CH₄ buiten de vergister ontsnapt, dus gebruik van verse mest is cruciaal (Zwart *et al.*, 2006).

3.4. Effect van vergisting op samenstelling mest

Door vergisting verandert de samenstelling van het te vergisten product. Organische stof in het substraat wordt afgebroken. Vooral makkelijk afbreekbare organische verbindingen worden afgebroken (Huijsmans *et al.*, 2007). Timmerman *et al.* (2005) vinden voor vluchtige vetzuren een gemiddelde reductie van 96% en afhankelijk van de mestsoort, een afname van 38% van de organische stof. Afbraak van organische verbindingen betekent dat nutriënten die organisch gebonden waren, kunnen vrijkomen in anorganische vorm. Verschillende bronnen geven bijvoorbeeld aan dat de concentratie ammoniakaal stikstof hoger is na vergisting (Demirer *et al.*, 2005; Timmerman *et al.*, 2005; Huijsmans *et al.*, 2007). De Boer (2004) vindt echter vrijwel geen verschil in concentratie ammoniakaal stikstof voor en na vergisting. Zie voor vergelijking van de waarden gevonden door de Boer (2004) en Timmerman *et al.* (2005) en voor een indicatie van de toenames van verschillende stoffen Tabel 17.

Tabel 17: Den Boer (2004) en Timmerman *et al.* (2005) hebben concentraties van verschillende stoffen gemeten in substraat en digestaat, voor en na vergisting. De tabel geeft de relatieve verandering van de concentratie als gevolg van vergisting

	(Boer, 2004)		(Timmerman <i>et al.</i> , 2005)	
	Meting 1	Meting 2	Tap 3	Na vergisting
Inhoud [g/kg]	%	%	%	%
Drogestof	76	66	53	53
Asrest	100	90		
Organische stof	68	58	44	42
N-totaal	97	97	101	118 ¹
N-NH₃	100	108	134	142
N-organisch			86	107
P₂O₅	87	-	110	111
K₂O	94	-	112	117
Hemicellulose	38	-		
Cellulose	66	-		
Lignine	102	-		
Overig	72	-		
pH	106	113	126	123

¹: Van deze waarde zeggen Timmerman *et al.* dat het een meetfout moet zijn, omdat het totaal stikstofgehalte niet kan veranderen door vergisting. Dit betekent ook dat of de waarde van ammoniakaal-N óf de waarde van organisch-N onjuist is gemeten na vergisting.

Het totale stikstofgehalte zou door vergisting in theorie niet veranderen, maar in onderzoeken wordt zowel toename als afname van totaal stikstof gevonden (Timmerman *et al.*, 2005; Huijsmans *et al.*, 2007). Timmerman *et al.* (2005) geven echter aan dat een hoger totaal

stikstofgehalte na vergisting niet mogelijk is. Door afbraak van de organische verbindingen wordt het drogestofgehalte verlaagd. Ook wordt mest dunner en homogener doordat slijmstoffen worden afgebroken. Mede hierdoor is vergiste mest beter geschikt voor mestbewerking of mestverwerking dan onvergiste mest (Lent *et al.*, 2001).

3.5. Emissie op het mesttraject bij (co-)vergisting van runderdrijfmest: resultaten en discussie

Voor analyse van de emissie van gassen als gevolg van (co-)vergisting van runderdrijfmest ten opzichte van de emissie in hoofdstuk 2, dient eerst gekeken te worden naar de wijzigingen op het mesttraject. Hiervoor worden de schematische weergaven in Figuur 2 en Figuur 5 vergeleken.

Bronnen van waaruit emissie plaatsvindt, maar niet zal veranderen door het wijzigen van het mesttraject zijn: de koe op stal, de koe in de wei en de emissie daardoor vanaf het grasland. Bronnen van waaruit de emissie zal veranderen zijn: de mestkelder, de mestopslag en gras- en bouwland waar bemest is.

Bijkomende bronnen zijn: de mengput/vergister, de naopslag/navergister, het land waar co-product wordt geteeld en de opslag voor co-producten.

3.5.1 Emissie van broeikasgassen

Mestvergisting heeft op drie manieren invloed op de emissie van broeikasgassen. Allereerst wordt methaanemissie uit mestopslagen verlaagd. Door verbranding van het ontstane biogas wordt elektriciteit en warmte geproduceerd. Door dit goed te gebruiken kan gebruik van fossiele brandstoffen worden vermeden (Wagenberg *et al.*, 2003; Sebek *et al.*, 2006; Zwart *et al.*, 2006; Møller *et al.*, 2007; Haperen *et al.*, 2009). Hier zal alleen de directe invloed op de emissie onderzocht worden.

Vergisten van drijfmest alleen resulteert in de grootste reductie van broeikasgasemissie, maar om vergisting van drijfmest economisch rendabel te maken lijkt co-vergisting een must. Productie en opslag van co-producten verhoogt echter de emissie van broeikasgassen. Als co-producten speciaal geteeld worden, zal lachgas ontstaan tijdens de teelt. Maar ook als afvalproducten worden gebruikt als co-product zal er tijdens opslag van de co-producten emissie van broeikasgassen optreden (Lent *et al.*, 2001; Zwart *et al.*, 2006; Thomassen *et al.*, 2008a).

Co-vergisting is een complex proces, waarbij elk substraat anders kan zijn, afhankelijk van het type en de hoeveelheid co-product en dus variëren ook de biogasopbrengsten sterk. Daarnaast zijn zeer weinig gegevens over emissie als gevolg van co-vergisting bekend. Tegelijk is wel bekend dat vergisting van alleen mest resulteert in de grootste emissiereductie. Daarom is ervoor gekozen om geen berekeningen uit te voeren voor co-vergisting, maar alleen voor vergisting van drijfmest, waarbij verondersteld kan worden dat emissie als gevolg van co-vergisting minimaal zo groot is.

Ook concrete cijfers over de emissie van broeikasgassen bij mestvergisting zijn in de literatuur zeer weinig te vinden. Wel geven diverse bronnen percentages van besparing of emissie. Duidelijk is in ieder geval dat door vergisting afname van methaanemissie optreedt, maar toename van de koolstofdioxide-emissie, mede door verbranden van methaan.

Voor mestvergisting is het belangrijk dat gebruikte mest zo vers mogelijk is. Daarom wordt er hier van uitgegaan dat drijfmest zo snel mogelijk van de mestkelder naar de vergister wordt gepompt.

Beschrijving van gevonden gegevens wordt gedaan door deze per emissiebron te ordenen. Als er over vermindering wordt gesproken, is dit een vermindering ten opzichte van het drijfmestsysteem zonder vergisting:

- Voor emissie uit opslag van mest geven Kuikman *et al.* (2005) aan dat een vermindering van 95% in CO₂-equivalenten (vanwege methaan) optreedt door vergisting. Mol *et al.* (2004) zeggen dat emissie van methaan vanuit opslag geheel vermeden wordt. Zwart *et al.* (2006) geven aan dat als verse mest gebruikt wordt, de emissie van methaan, lachgas en ammoniak 5% is van de emissie bij lang opgeslagen mest;
- Voor emissie tijdens uitrijden van vergiste mest zijn gegevens zeer beperkt beschikbaar. De literatuur is ook niet consistent. Er worden zowel hogere als lagere emissies gemeten, waarbij de afwijking soms niet significant is. Dit geldt voor zowel lachgas als voor methaan (Huijsmans *et al.*, 2007; Mosquera *et al.*, 2007);
- Zwart *et al.* (2006) en Thomassen *et al.* (2008a), geven aan dat mestvergisting een emissiereductie voor methaan geeft van 95% over het gehele mesttraject. Van Lent *et al.* (2001) geven aan dat scenario's die zij hebben doorgerekend voor vergisting een reductie geven van 43 en 52 kg CO₂-equivalenten per m³ mest, afhankelijk van het beweidingssysteem. Dit komt overeen met respectievelijk 1118 en 1352 kg CO₂-equivalenten per koe;
- Voor emissie van broeikasgassen vanuit de vergisters geven Mol *et al.* (2004) aan dat voor lekverliezen alles tussen 0 en 100% mogelijk is, maar dat voor Nederland een aanname van 5% lekverlies reëel lijkt. Dit percentage is echter sterk afhankelijk van het management. Zwart *et al.* (2006) doen een aanname van 1% lekverlies uit de vergister;
- Voor lachgasemissie tijdens teelt van het co-product maïs geven van Lent *et al.* (2001) een waarde van 4,2 kg N₂O per hectare maïs;
- Voor emissie tijdens opslag van co-producten doen Thomassen *et al.* (2008b) de aanname dat zowel de methaan- als de lachgasemissie 5% is van die van lang opgeslagen mest.

De emissie van broeikasgassen wordt doorgerekend voor de situatie waarin alleen runderdrijfmest wordt vergist.

Emissie van CH₄ bij vergisting van alleen rundveedrijfmest:

Het uitgangspunt voor CH₄-emissie is Tabel 5. Bij gelijkblijvend beweiding- en voederregime kan gesteld worden dat emissie door pensfermentatie en door beweiden niet verandert. Ook wordt aangenomen dat de methaanemissie tijdens uitrijden van vergiste mest gelijk blijft. Dit is geen probleem, aangezien emissie tijdens uitrijden in verhouding een kleine invloed heeft. Er is voor methaan ook niet veel reden om aan te nemen dat na vergisting meer emissie zal optreden dan bij onvergiste drijfmest na uitrijden. Voor emissie tijdens mestopslag wordt aangenomen dat 5% van de emissie uit Tabel 5 optreedt, zoals aangegeven door Kuikman *et al.* (2005) en Zwart *et al.* (2006). Extra emissiebronnen zijn de beide vergisters. Hiervoor wordt aangenomen dat een lekverlies van 5% over de totale biogasproductie van beide vergisters optreedt. Aangegeven is dat per m³ drijfmest ongeveer 20 m³ biogas ontstaat. Er wordt uitgegaan van een percentage van 60% methaan en dus 40% koolstofdioxide in het biogas. CH₄ en CO₂ hebben een dichtheid van respectievelijk 0,654 en 1,799 kg/m³ (Senternovem, 2007). Dit betekent dat bij een productie van 26 m³ drijfmest per koe, 520 m³ biogas wordt geproduceerd. Dit bevat 204 kg CH₄. 5% hiervan lekt naar de omgeving. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 18. In deze tabel is ook de emissie van methaan in het drijfmeststelsel weergegeven (Vergelijk Tabel 5).

Emissie CH₄ (co-vergisting):

Ten opzichte van emissie bij vergisting van alleen mest vindt extra emissie plaats vanuit de vergisters door hogere methaanproductie en vanuit de teelt en opslag van co-producten. De aanname van gelijkblijvende emissie na uitrijden wordt ook hier gedaan en ook voor pensfermentatie en beweiding blijven emissies gelijk. Vergisting van rundveedrijfmest alleen geeft de laagste CH₄ emissie, afhankelijk van het type en de hoeveelheid co-product zal de methaanemissie alleen maar stijgen.

Tabel 18: Methaanemissie in kg per koe per jaar op het mesttraject bij vergisting van runderdrijfmest in vergelijking met het drijfmeststelsel

	Methaanemissie in kg per koe per jaar	
	Drijfmeststelsel	Vergisting drijfmest
Kg CH ₄ per koe per jaar door pensfermentatie	125	125
Kg CH ₄ per koe per jaar door mestopslag	40	2,1
Kg CH ₄ per koe per jaar door mestvergisters	-	10,2
Kg CH ₄ per koe per jaar door beweiden	0	0
Kg CH ₄ per koe per jaar door uitrijden mest	2	2
Totaal kg CH ₄ per koe per jaar	170	139,3

Er vindt bij vergisting van alleen drijfmest een daling van methaanemissie plaats van zo'n 18%. Dit is geheel te danken aan vermindering van emissie tijdens opslag van mest. Het lekverlies vanuit de vergisters is nog wel een grote emissiebron, maar de besparing is ongeveer vier maal zo groot als het lekverlies.

Emissie N₂O bij vergisting van alleen rundveedrijfmest:

Tabel 6 geeft de lachgasemissie weer in de drijfmest situatie. Deze emissiewaarden zijn ook opgenomen in Tabel 19. Met deze gegevens als uitgangspunt kan gezegd worden dat de emissie door beweiding niet wijzigt bij gelijkblijvend beweidingstelsel. Ook voor emissie door uitrijden van het digestaat wordt dezelfde waarde genomen als bij uitrijden van drijfmest met voornoemde redenen. Voor emissie uit de mestkelder wordt 5% genomen van de emissie uit kelder en buitenopslag, zoals aangegeven door Zwart *et al.* (2006). Er zijn geen gegevens gevonden over emissie van lachgas tijdens vergisting. In biogas bevindt zich geen lachgas. Emissie vanuit de vergisters wordt daarom gelijk gesteld aan 0. De totale emissie is de som van alle emissies. Zie Tabel 19 voor de resultaten.

Tabel 19: Lachgasemissie in kg per koe per jaar op het mesttraject bij vergisting van runderdrijfmest in vergelijking met het drijfmeststelsel

	Lachemissie in kg per koe per jaar	
	Drijfmeststelsel	Vergisting drijfmest
Kg N ₂ O per koe per jaar uit stal / kelder	0,15	0,0085
Kg N ₂ O per koe per jaar uit buitenopslag	0,019	-
Kg N ₂ O per koe per jaar door mestvergisters	-	0
Kg N ₂ O per koe per jaar door beweiden	0,69	0,69
Kg N ₂ O per koe per jaar door uitrijden mest	1,82	1,82
Totaal kg N ₂ O per koe per jaar	2,68	2,52

Vergisting van drijfmest resulteert in slechts een kleine afname van de lachgasemissie. Dit komt doordat emissie vanuit opslag van drijfmest ook al een relatief klein aandeel had in totale emissie. Dit is vervolgens de enige bron waar vergisting van drijfmest effect op heeft, zodat de vermindering van lachgasemissie ongeveer 6% bedraagt.

Emissie CO₂ bij vergisting van alleen rundveedrijfmest:

Tabel 7 bevat de emissie van koolstofdioxide in het drijfmeststelsel. De gegevens zijn opgenomen in Tabel 20. Bij vergisting wijzigt de emissie vanuit de koe en de emissie na mesttoediening niet. Voor de mesttoediening wordt uitgegaan van gebruik van een zodebemester. Voor emissie vanuit de mestkelder bij gebruik van verse mest, wordt 5% van de emissie uit kelder en buitenopslag bij langdurige opslag genomen. Extra emissiebronnen zijn de beide vergisters. Hiervoor wordt aangenomen dat een lekverlies van 5% over de totale biogasproductie van beide vergisters optreedt, maar voor CO₂ geldt dat uiteindelijk alles naar de omgeving zal verdwijnen, als het niet aan bijvoorbeeld kassen geleverd wordt.

Aangegeven is dat per m³ drijfmest ongeveer 20 m³ biogas ontstaat. Er wordt uitgegaan van een percentage van 40% koolstofdioxide in het biogas. Bij een dichtheid van 1,799 kg/m³ en een productie van 26 m³ drijfmest per koe betekent dit een productie van 374 kg CO₂.

Daarnaast wordt het methaan verbrand en ontstaat bij die verbranding ook CO₂ volgens de volgende vergelijking: $\text{CH}_4 + 2\text{x O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{x H}_2\text{O}$. De moleculaire massa van CH₄ en CO₂ is respectievelijk 16 en 44 kg per kmol. Bij verbranding van 1 kg CH₄ ontstaat dus $44 / 16 = 2,75$ kg CO₂. Er wordt per koe 204 kg CH₄ geproduceerd, waarvan 95% verbrand wordt. Dan ontstaat er dus $204 \cdot 0,95 \cdot 2,75 = 533$ kg CO₂. Dit moet ook aan het vergistingsproces worden toegerekend. De totale emissie per koe per jaar is de som van het bovenstaande. Zie Tabel 20 voor de resultaten. De emissie per koe per jaar door mestvergisters in deze tabel is dus de som van emissie als gevolg van lekverlies en emissie na verbranding.

Tabel 20: koolstofdioxide-emissie in kg per koe per jaar op het mesttraject bij vergisting van runderdrijfmest in vergelijking met het drijfmeststelsel

CO ₂ -emissie	CO ₂ -emissie in kg per koe per jaar	
	Drijfmeststelsel	Vergisting drijfmest
Totaal kg CO ₂ per koe per jaar door koe	4000	4000
Kg CO ₂ per koe per jaar door mestopslag in kelder	1500	82,5
Kg CO ₂ per koe per jaar door buitenopslag	150	-
Kg CO ₂ per koe per jaar door mestvergisters	-	907
Kg CO ₂ per koe per jaar door mesttoediening (zodebemester)	81,9	81,9
Totale emissie per koe per jaar	5732	5071

Emissie van CO₂ daalt bij vergisting van drijfmest met ongeveer 12%. Ook hier blijkt de besparing op emissie doordat er vrijwel geen opslag van mest plaatsvindt, groter te zijn dan emissie door lekverlies en verbranding van biogas. Dit is niet geheel volgens verwachting. Het lijkt logisch dat bij vergisting in ieder geval net zoveel CO₂ ontstaat als gedurende opslag van mest en daar komt nog emissie als gevolg van verbranding van methaan bij.

Emissie broeikasgas in CO₂-equivalenten bij vergisting van alleen rundveedrijfmest:

Uit de tabellen 18 tot en met 20 is de totale broeikasgasemissie in CO₂-equivalenten te berekenen, met hulp van de global warming potentials uit Tabel 2. Dit is weergegeven in tabel 21.

Tabel 21: Totale broeikasgasemissie bij vergisting van drijfmest, de bijdrage van de afzonderlijke gassen in procenten en de bijdrage per bron aan de totale emissie

	Drijfmestsyst.	Vergisting van rundveedrijfmest				
	CO ₂ -equiv. [kg · koe ⁻¹ · jaar ⁻¹]	CH ₄ %	N ₂ O %	CO ₂ %	CO ₂ -equiv. [kg · koe ⁻¹ · jaar ⁻¹]	Bijdrage per bron
Emissie vanuit koe	6625	39,6	0	60,4	6625	75,5%
Emissie door mestopslag in mestkelder	2387 208	34,1	2,0	63,8	129	1,5%
Emissie door mestvergisters	-	19,1	0	80,9	1121	12,8%
Emissie door beweiding	214	0	100	0	214	2,4%
Emissie door uitrijden mest (zodebemesting)	688	6,1	82,0	11,9	688	7,8%
Totale emissie per koe per jaar (zodebemesting)	10133	33,3	8,9	57,8	8778	100%

Emissie van broeikasgassen daalt als alleen drijfmest wordt vergist. De daling bedraagt hier 1355 kg CO₂-equivalenten. Dit is vergelijkbaar met de reductie die berekend is door Lent *et al.* (2001), die afhankelijk van het beweidingssysteem, een reductie vinden van 1118 of 1352 kg CO₂-equivalenten per koe. De emissie door de vergisters maakt 12,8% uit van de totale emissie. Dit is wel de op één na belangrijkste bron, maar in vergelijking met emissie door uitrijden is dit toch niet enorm veel. Wel kan goed management van de vergisters, zodat lekverlies geminimaliseerd wordt, nog wel bijdragen aan een verdere vermindering van de broeikasgasemissie. De emissie vanuit de koe heeft veruit de grootste bijdrage.

3.5.2 Emissie van Ammoniak

De ammoniakemissie gedurende het mesttraject zal veranderen doordat de samenstelling van de mest verandert. Er zijn drie effecten die hier de oorzaak van zijn. Allereerst is de pH van vergiste mest hoger dan van onvergiste mest. Een hogere pH verhoogt theoretisch de ammoniakemissie. Ook is de concentratie ammoniakaal stikstof in vergiste mest hoger. Ook dit is bevorderlijk voor ammoniakemissie. Aan de andere kant is het drogestofgehalte van vergiste mest lager, wat resulteert in snellere infiltratie na uitrijden en dus een verlaging van de ammoniakemissie (Lent *et al.*, 2001; Mosquera *et al.*, 2007).

Aangezien mest zo kort mogelijk in de kelder verblijft en daarna continu is afgedekt, zal op dit deel van het mesttraject minder ammoniak ontsnappen. Zwart *et al.* (2006) doen de aanname dat de emissie van ammoniak tijdens opslag en vergisting 5% is van de emissie van langdurig opgeslagen mest.

Naar verwachting zal door de veranderingen in de mest, ammoniakemissie na uitrijden hoger zijn dan voor drijfmest. Maar hierover is in de literatuur geen overeenstemming. Zowel hogere als lagere emissiewaarden worden gevonden, waarbij een deel van de verschillen niet significant is (Huijsmans *et al.*, 2007; Mosquera *et al.*, 2007).

Zwart *et al.* (2006) doen de aanname dat als er co-vergist wordt met een geteeld co-product, er geen emissiereductie plaatsvindt, doordat besparing tijdens opslag en vergisting teniet wordt gedaan door emissie tijdens uitrijden en teelt van co-producten.

De ammoniakemissie in geval van teelt van maïs als co-product is 17 kg/ha (Lent *et al.*, 2001).

Deze gegevens zijn onvoldoende om berekeningen te kunnen doen aan emissie van ammoniak uit de vergisters en na het uitrijden. Voor co-vergisting kan gezegd worden dat de ammoniakemissie stijgt. In ieder geval door vergroting van de hoeveelheid mest. Als co-producten speciaal worden geteeld is de toename nog sterker. Zie voor waarden die wel bekend zijn Tabel 22.

Tabel 22: Ammoniakemissie bij vergisting van drijfmest

	NH ₃ -emissie in kg per koe per jaar	
	Drijfmeststelsysteem	Vergisting drijfmest
Totaal kg NH ₃ per koe per jaar door koe	0	0
Kg NH ₃ per koe per jaar door mestopslag	10	0,5
Kg NH ₃ per koe per jaar door buitenopslag	0,6	-
Kg NH ₃ per koe per jaar door mestvergisters	-	Onbekend
Kg NH ₃ per koe per jaar door beweiding	1,2	1,2
Kg NH ₃ per koe per jaar door mesttoediening (zodebemester)	12	Onbekend
Totale NH ₃ emissie per koe per jaar	23,8	Onbekend

Ammoniakemissie vanuit de mestopslagen draagt in het drijfmeststelsysteem ongeveer 44% bij aan de totale emissie. Hier vindt een grote reductie plaats. Onbekend is dus of emissie door de mestvergisters en door mesttoediening deze afname compenseert.

3.5.3. Emissie van geurstoffen

In verschillende bronnen wordt gewezen op het effect van vergisting van drijfmest op de emissie van geurstoffen. Deze geurstoffen zijn niet zozeer schadelijk als wel hinderlijk voor de omgeving.

Geurstoffen ontstaan meestal als gevolg van onevenwichtige afbraak van vluchtige vetzuren door anaerobe bacteriële activiteit in bijvoorbeeld mestopslagen en na uitrijden van mest. Bij een juist design van een vergister is het anaerobe proces in balans en zullen geurstoffen worden afgebroken (Wilkie, 2005). Ook Huijsmans *et al.* (2007) geven aan dat in onderzoeken veelal reductie in geuremissie wordt gevonden voor vergiste mest in vergelijking tot onvergiste mest. Zij verklaren dit door de afbraak van vluchtige vetzuren tijdens vergisting en door een snellere infiltratie van digestaat na uitrijden door de lagere viscositeit. Emissie van geurstoffen is moeilijk te kwantificeren.

3.6. Bruikbaarheid en effectiviteit van digestaat als meststof

Als mest anaeroob vergist wordt, verandert de samenstelling ervan. Ook als co-producten worden mee vergist heeft het digestaat een andere samenstelling dan drijfmest. Dat betekent dat ook de bruikbaarheid en de effectiviteit van digestaat als meststof verandert.

De Boer (2004) heeft onderzoek gedaan naar de effectiviteit van vergiste runderdrijfmest als meststof voor gras op kleigrond en dit vergeleken met de effectiviteit van onvergiste runderdrijfmest. De verwachting vooraf was dat de snelle werking van vergiste mest hoger zou zijn dan de snelle werking van onvergiste mest door een hoger ammoniakaal-N gehalte. Terwijl de nalevering van vergiste mest lager zou zijn, door minder organisch gebonden stikstof.

Proeven wezen uit dat bij lage dosering er geen significant verschil was in de werking van beiden. Bij hogere dosering echter was de grasopbrengst van de snede volgend op bemesting, voor bemesting met vergiste mest significant hoger dan voor bemesting met onvergiste mest. Ook verdubbeling van de mestgift resulteerde bij vergiste mest in een sterkere opbrengststijging. Ook bleek bij bemesting met vergiste mest de stikstofopbrengst van het

gras significant hoger te zijn. Voor de langdurige werking van beide mestsoorten werd echter geen verschil gevonden.

Opvallend was dat ondanks dat de TAN-gehalten van vergiste en onvergiste mest vergelijkbaar waren, er toch verschil was in snelle werking. Den Boer *et al.* (2008) geven hiervoor de volgende mogelijke verklaring: doordat een groot deel van de vluchtige vetzuren tijdens vergisting is afgebroken, zal er na bemesting minder bacteriegroei optreden. Daarom zal minder stikstof worden geïmmobiliseerd.

Bevestiging van hogere snelle werking door hoger ammoniakaal stikstofgehalte wordt gegeven door Schröder *et al.* (2007), Amon *et al.* (2006) en Den Boer *et al.* (2008). Zij geven de volgende aanvullingen: Vergiste mest is gevoeliger voor uitspoeling en de nawerking is lager dan van onvergiste mest (Schröder *et al.*, 2007). Ook een lager C/N-ratio geeft aan dat meer stikstof direct beschikbaar is na uitrijden. De C/N-ratio van vergiste mest is lager dan van onvergiste mest, door omzetting van opgeloste koolstofverbindingen in methaan (Amon *et al.*, 2006). Werking van mest kan berekend worden op basis van TAN, OS en N-totaal, maar voor vergiste mest blijkt deze berekening een onderschatting te geven van de werkelijke werking (Boer *et al.*, 2008).

Meuffels *et al.* (2007) doen verslag van een onderzoek naar de N-werking van het digestaat van varkensdrijfmest in vergelijking met de originele mest. Zij concluderen dat digestaat een waardevolle meststof is en dat hun proef de indruk geeft dat de N-werking van digestaat van varkensdrijfmest beduidend hoger is dan de N-werking van onvergiste varkensdrijfmest.

Ook de Boer en Timmerman (2006) rapporteren over onderzoeken gedaan aan de werkzaamheid van digestaat. In dit geval gaat het om co-vergiste varkensmest in vergelijking met onvergiste varkensdrijfmest. Zij concluderen dat de N-opbrengst bij bemesting van gras (in potproeven) met digestaat hoger is dan bij bemesting met varkensdrijfmest. De schijnbare N-benutting van de co-vergiste drijfmest was weinig lager dan de N-benutting van KAS kunstmest. (Respectievelijk 65 en 68%)

Als andere voordelen van digestaat over onvergiste mest worden genoemd dat een deel van de aanwezige onkruidzaden ook wordt vergist en dat een deel van de ziektekiemen in de mest tijdens vergisting wordt gedood (Boer, 2004; Wilkie, 2005).

Gebruik van vergiste mest lijkt tot besparing op het gebruik van kunstmest te kunnen leiden (Boer, 2004; Schröder *et al.*, 2007).

Wat betreft de handelbaarheid van digestaat blijft een groot deel van de in hoofdstuk 2.6 genoemde eigenschappen van drijfmest gelden. Korstvorming en neerslaan van vaste delen kan mixen noodzakelijk maken en verpompen en regelmatig uitrijden bemoeilijken. De inhoud van nutriënten is niet van te voren bekend en onregelmatig verdeeld. Er is nog een groot deel organisch gebonden stikstof aanwezig, waarvan onbekend is wanneer dit vrij zal komen. Ook geldt dat de verhouding van fosfaat en stikstof in digestaat meestal niet overeenkomt met de behoefte van het gewas.

3.7. Conclusie

Door anaerobe vergisting verandert de samenstelling van het vergiste product. Organische verbindingen worden afgebroken en daardoor kunnen organisch gebonden nutriënten vrijkomen in anorganische vorm. Digestaat van rundveemest is meer vloeibaar, homogener en bevat meer ammoniakaal stikstof. Vergiste mest lijkt hierdoor beter geschikt voor verdere bewerking, zoals mechanische scheiding van mest, dan onvergiste mest.

Voor het mesttraject bij vergisting van drijfmest is de broeikasgasemissie per koe per jaar 8778 kg CO₂-equivalenten. Daarvan is 33,3% door CH₄, 8,9% door N₂O en 57,8% door CO₂ (Zie Tabel 21). Emissie vanuit de koe zelf levert de grootste bijdrage van 75,5%. De bijdrage

vanuit de afgedekte buitenopslag verdwijnt, maar in plaats daarvan is er emissie door de vergisters met een aandeel van 12,8%. Bemesting zorgt voor 6,8% van de emissie, beweiding voor 2,4% en mestopslag in de mestkelder levert een bijdrage van 1,5%. Zie ook Tabel 21.

Over de emissie van ammoniak in kg NH₃ per koe per jaar is te weinig bekend om conclusies te kunnen trekken. Duidelijk is dat emissie vanuit de mestkelder sterk daalt, doordat mest daar maar korte tijd verblijft, maar onbekend is wat de emissies zijn tijdens vergisten en uitrijden van de mest. Daardoor is ook de totale ammoniakemissie bij vergisting van runderdrijfmest niet te bepalen.

Voor co-vergisting zijn geen concrete waarden gevonden, maar de emissie van zowel ammoniak als van broeikasgassen zal stijgen, door emissie vanuit teelt en opslag, extra lekverliezen en door een hogere biogas- en digestaatproductie.

Digestaat is een waardevolle meststof en heeft een aantal voordelen over drijfmest. De stikstofwerking lijkt hoger te zijn dan van drijfmest, deels doordat meer ammoniakaal stikstof en minder organisch stikstof aanwezig is. De nawerking van digestaat is wel minder dan van drijfmest, maar dat verhoogt de voorspelbaarheid. Over het algemeen wordt digestaat als een betere meststof gezien dan drijfmest, maar de verhouding van de nutriënten sluit ook niet aan op de behoeften van het gewas.

De handelbaarheid is hoger dan van drijfmest, door grotere homogeniteit en vloeibaarheid, maar pompen en mixen is nodig, omdat korstvorming of neerslaan van vaste delen ook in digestaat optreedt.

4. Scheiden van feces en urine

Dit hoofdstuk gaat over het effect van scheiden van feces en urine op de samenstelling, de bruikbaarheid van beide stromen, de grootte van de emissies die optreden op het mesttraject en de bijdragen per bron.

4.1. Kracht van Koeien

‘Kracht van Koeien’ is een project uitgevoerd in opdracht van het ministerie van LNV als onderdeel van het onderzoeksprogramma ‘Verduurzaming Productie en Transitie. Als onderdeel van de onderzoeksresultaten is een brochure uitgebracht met daarin vier ontwerpen die als inspiratiebron kunnen dienen op weg naar een duurzame veehouderij.

Verbeteringen voor het milieu ten opzichte van de huidige situatie in de melkveehouderij zouden moeten zijn: een reductie in ammoniakemissie van 75%, een reductie in broeikasgasemissie van 50-75%, een reductie in vermisting van 75%, de mogelijkheid van klimaatneutraliteit door productie van groene energie, een kleinere ecologische voetafdruk van (kracht)voerproductie en een grotere biodiversiteit op het bedrijf en in de omgeving.

Om deze verbeteringen te realiseren is een geheel nieuw systeem van melkvee houden bedacht en beschreven. De ligboxenstal is verdwenen en in plaats daarvan zijn drie gebieden beschikbaar:

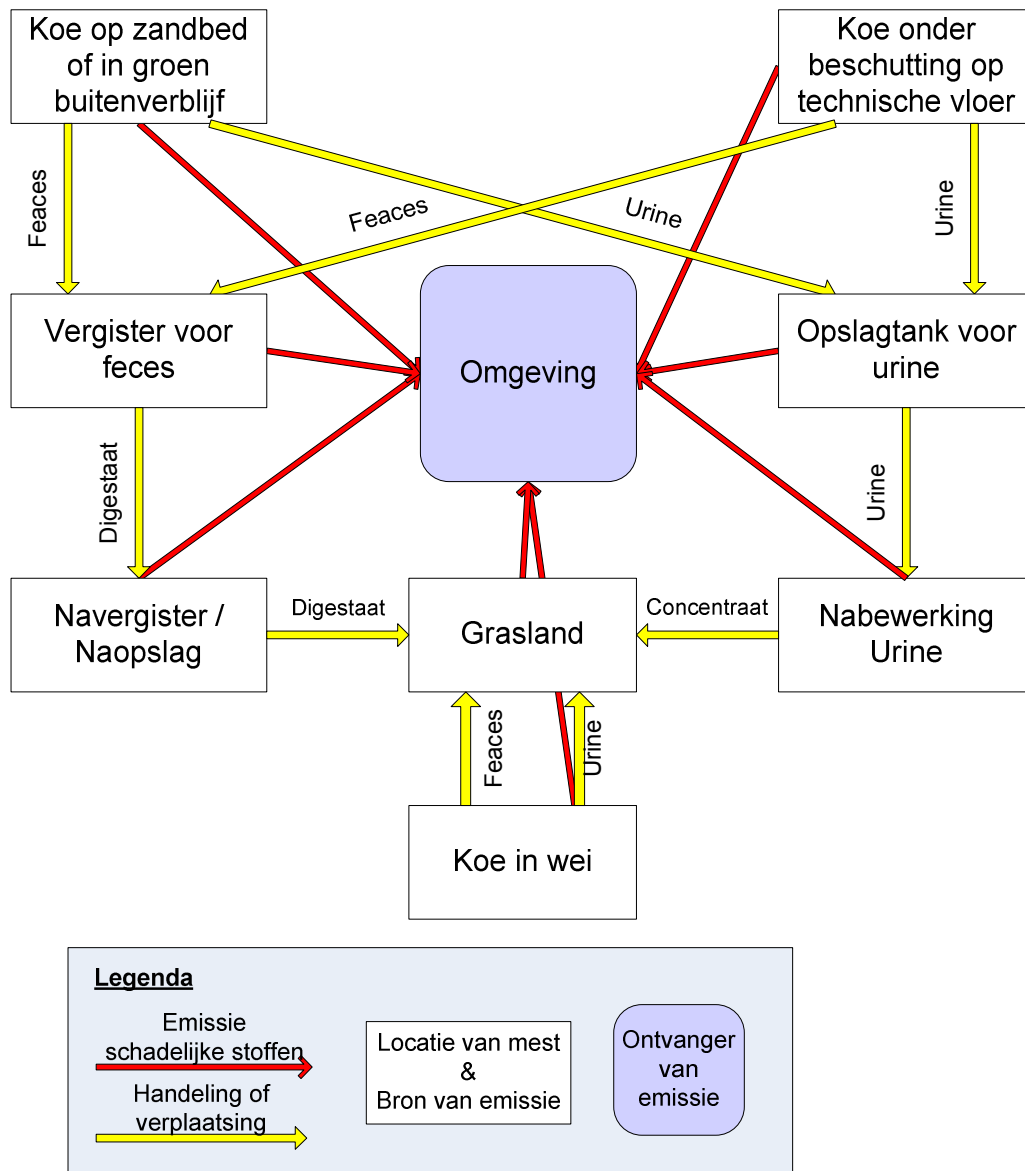
- De beschutting: een vrij simpele constructie die het vee beschermt tegen de weersomstandigheden tijdens rusten, voeren en melken;
- Een zandbed, dat niet overdekt is en door de koeien kan worden gebruikt als ligruimte;
- Het groene buitenverblijf: een grasveld dat in de eerste plaats voor liggen en bewegen is bedoeld. Grasproductie komt op de tweede plaats.

In deze drie gebieden worden mest en urine gescheiden opgevangen. In het geval van de beschutting door middel van een technische vloer. In het zandbed en het groene buitenverblijf wordt de urine afgevangen door middel van een drainagesysteem en wordt de mest verzameld. Naast deze drie gebieden is er weidegrond waar de koeien kunnen grazen. De weidegrond is niet bedoeld voor rusten en liggen, om zo min mogelijk feces en urine hier terecht te laten komen. De verwachting is dat van de feces en urine ongeveer 50% terecht komt onder de beschutting, 25% in het zandbed, 20% in het groene buitenverblijf en 5% op de weidegrond. Om de emissies minimaal te houden moeten feces en urine zo snel mogelijk worden afgevoerd en opgeslagen. Vervolgens kunnen ze apart van elkaar worden verwerkt tot bruikbare meststoffen, de urine tot een stikstofconcentraat en de vaste mest kan worden vergist en vervolgens worden gebruikt als meststof (Bos *et al.*, 2009).

4.2. Het mesttraject volgens ‘Kracht van Koeien’

Gezien de beschrijving in 4.1 is ook voor de ideeën van Kracht van Koeien een schematische weergave van het mesttraject te maken, vergelijkbaar met figuren 2 en 5.

Voor de koe zijn er drie verschillende posities. Koeien op het zandbed en in het groene buitenverblijf worden als één bron gezien. Er wordt dus aangenomen dat emissies hier vergelijkbaar zullen zijn, omdat het systeem van drainage vergelijkbaar is en er geen specifieke gegevens beschikbaar zijn. De andere posities voor de koe zijn onder de beschutting op de technische vloer en in de wei. Feces wordt afgevoerd en vergist, vervolgens moet het digestaat worden opgeslagen en wellicht navergist. Urine wordt opgeslagen en vervolgens verwerkt tot een kunstmestvervanger. Bij uitrijden van digestaat en kunstmestvervanger zal ook emissie optreden. Figuur 6 bevat de schematische weergave van het mesttraject.



Figuur 6: Het mesttraject op een melkveebedrijf volgens de ideeën van Kracht van Koeien

4.3. Alternatieve behandeling van mest

Ter vervanging van het mineralen aangifte systeem (MINAS) is er in 2006 een nieuw mineralenbeleid geïntroduceerd dat bestaat uit een stelsel van gebruiksnormen voor mineralen. Dit nieuwe beleid resulteert in een groter mestoverschot voor de Nederlandse landbouw, omdat de hoeveelheid afgezette drijfmest vaak wordt beperkt door de gebruiksnorm voor fosfaat, terwijl er voor stikstof nog ruimte is. Regelmatig moet dan drijfmest worden afgevoerd, terwijl stikstof uit kunstmest alsnog moet worden aangevoerd (Melse *et al.*, 2004; Verloop *et al.*, 2007; Boer *et al.*, 2008; Verloop *et al.*, 2008). Mestbe- en verwerking kan ervoor zorgen dat toch meer mest kan worden afgezet en dat mineralen gericht en wellicht onafhankelijk van elkaar kunnen worden toegepast. Melse *et al.* (2004) definiëren mestbewerking als een technische handeling met mest, waaruit mestproducten voortkomen die in de Nederlandse landbouw worden afgezet met een hogere acceptatiegraad dan normale drijfmest. Mestverwerking definiëren zij als technische handelingen met mest, waaruit mestproducten voortkomen die buiten de Nederlandse landbouw worden afgezet. Vergisting van mest, zoals beschreven in hoofdstuk 3 is ook een vorm van mestbewerking.

Door de Haan *et al.* (2003) en Den Boer *et al.* (2008) worden verschillende mestbe- en verwerkingsmethoden beschreven die bruikbaar zijn voor rundveedrijfmest.

Vergisting en co-vergisting worden genoemd als momenteel de belangrijkste technieken voor be- en verwerking van rundveemest. Ook scheiden van mest in een dunne en een dikke fractie is een vorm van mestverwerking. Hiervoor zijn verschillende technieken beschikbaar. Deze technieken zijn als volgt te verdelen:

- Primaire scheiding, waarbij mest en urine direct van elkaar gescheiden worden door bijvoorbeeld een sleufvloer;
- Eenvoudige scheiding van drijfmest, door drijfmest bijvoorbeeld over een strofilter te laten lopen;
- Mechanische of industriële mestscheiding, waarbij drijfmest bijvoorbeeld door middel van een centrifuge of een pers gescheiden wordt in een dunne en een dikke fractie.

Een methode ter voorkoming van ammoniakemissie is strippen van ammoniak uit mest, waar door toevoeging van natronloog aan mest ammoniak uit drijfmest ontsnapt. Vervolgens kan de ammoniak door gebruik van zwavelzuur uit de lucht gewassen worden. Den Boer *et al.* (2008) geven aan dat deze methode waarschijnlijk niet op kleine schaal bruikbaar is.

Voor de fracties die worden verkregen na mestscheiding is verder verwerken van één of beide fracties mogelijk. Een voorbeeld hiervan is het verwerken van de dunne fractie tot een kunstmestvervanger, of het vergisten van de dikke fractie.

Genoemde be- en verwerkingsmethoden kunnen op verschillende schaalgroottes toegepast worden: toepassing op een melkveehouderij is mogelijk, maar ook centrale toepassing met aanlevering door meerdere melkveehouderijen. In het project 'Kracht van Koeien' is gekozen voor een vorm van primaire mestscheiding en verdere verwerking van de deelproducten: de dikke fractie moet worden vergist en de dunne fractie kan worden bewerkt tot een kunstmestvervanger (Bos *et al.*, 2009).

4.4. Primaire mestscheiding en samenstelling feces en urine

Den Boer *et al.* (2008) noemen primaire mestscheiding als de beste scheidingsmethode, uitgaande van het scheidingsrendement. Onder scheidingsrendement wordt verstaan het percentage van de drogestof dat na scheiding in de dikke fractie terecht komt. Het doel van mestscheiding is om een dunne fractie te krijgen die veel minerale stikstof en weinig fosfaat bevat en een dikke fractie die weinig minerale stikstof en veel fosfaat bevat. In de dikke fractie dient dus zoveel mogelijk van het organische materiaal aanwezig te zijn. Op die manier is scheidingsrendement ook een indicatie voor de scheiding van het totale stikstof in organische en minerale stikstof (Schröder *et al.*, 2007). Een ander voordeel van primaire mestscheiding ten opzichte van andere scheidingsmethoden is uitstel van het ontstaan van ammoniak. Ammoniak ontstaat door omzetting van de in urine aanwezige ureum, onder invloed van het enzym urease. Urease is echter niet in urine aanwezig, maar bevindt zich wel in feces en in oppervlakken die met feces in aanraking zijn geweest. Hoe vroeger urine dus van feces gescheiden wordt, hoe langer het ontstaan van ammoniak wordt uitgesteld (Dooren *et al.*, 2007; Bos *et al.*, 2009).

In het project 'Kracht van Koeien' worden ideeën voor verschillende manieren van primaire mestscheiding aangedragen. Onder de beschutting wordt primaire mestscheiding gedaan door middel van een technische vloer. In het groene buitenverblijf en het zandbed vindt primaire scheiding plaats door infiltratie van de urine in de bodem of het zand, waarna het door middel van drainage kan worden afgevoerd.

Er zijn weinig gegevens bekend over primaire mestscheiding. De Haan *et al.* (2003) rapporteren over vier jaar primaire mestscheiding op de Waiboerhoeve in Lelystad. Daar wordt door middel van een dichte hellende vloer urine gescheiden van de feces en het rapport beschrijft hiervan de resultaten.

Hier wordt aangenomen dat de scheidingsresultaten van de technische vloer onder de beschutting en van het gedraineerde gras en zandbed vergelijkbaar zijn met de resultaten op de Waiboerhoeve wat betreft scheidingsrendement en samenstelling van de beide fracties. Dit omdat onderzoeksgegevens voor de werking van gedraineerd gras en zand volledig ontbreken. Als mest mechanisch gescheiden wordt, is de volumeverhouding van de dunne fractie tot de dikke fractie 71 : 29 (Schröder *et al.*, 2007). Voor primaire scheiding op de Waiboerhoeve is de gemiddelde verhouding 69 : 31. Hier zal worden aangenomen dat de 70% van de uitscheiding van het melkvee als urine wordt afgevangen en 30% als vaste mest. De Haan *et al.* (2005) geven de verdeling van nutriënten over de beide fracties. Voor de verdeling van organische stof is aangenomen dat dit voor de dunne fractie 40% is van de aanwezige drogestof (Boer *et al.*, 2008). De rest bevindt zich in de dikke fractie. Verdeling van de nutriënten is weergegeven in Tabel 23.

Tabel 23: Verdeling van nutriënten over dunne en dikke fractie bij primaire mestscheiding op de Waiboerhoeve (Haan *et al.*, 2003)

	Dikke fractie	Dunne fractie
% N-mineraal	21	79
% N-organisch	79	21
% P ₂ O ₅	79	21
% K ₂ O	27	73
% Drogestof	77	23
% Volume	30	70

Vanuit de samenstelling van drijfmest zoals weergegeven in Tabel 11 kan met de verdeling van nutriënten in Tabel 23 de concentratie van nutriënten in beide fracties worden berekend. Het resultaat hiervan is weergegeven in Tabel 24.

Tabel 24: Samenstelling van drijfmest en de dunne en dikke fractie bij primaire mestscheiding

	Samenstelling mestsoort in kg/ton		
	Drijfmest	Dikke fractie	Dunne fractie
N-totaal	4,4	7,2	3,3
N-organisch	2,1	5,5	0,6
Ammoniaktaal N	2,4	1,7	2,7
P ₂ O ₅	1,5	4,0	0,5
K ₂ O	6,4	5,8	6,7
Drogestof	86,8	223,8	28,5
Organische stof (OS)	63,0	183,4	11,4

Deze getallen zijn te vergelijken met waarden die Huijsmans *et al.* (2007b) aanhalen. Zij geven voor vaste rundveemest geproduceerd in een grupstal de volgende waarden: 7,1 en 6,4 gram per kg als waarden voor N-totaal en 248 en 1,2 gram per kg voor respectievelijk drogestof en ammoniaktaal stikstof. Dit is vergelijkbaar met de waarden die berekend zijn in Tabel 24.

Duidelijk is dat een groot deel van de organische stof en van de drogestof in de dikke fractie terecht komt. Hierdoor komt ook het grootste deel van het organische gebonden stikstof en fosfaat in de dikke fractie terecht. 73% van de kaliumoxide gaat naar de dunne fractie maar de concentratie in de beide fracties is uiteindelijk vergelijkbaar. Voor ammoniaktaal stikstof geldt dat een groot deel in de dunne fractie terecht komt, maar dat de dikke fractie ook nog een redelijk deel bevat. De verdeling over de dunne en de dikke fractie is ongeveer 39 en 61% respectievelijk.

De verwachting is dat van de feces en urine 50% op de technische vloer terecht komt, 25% op het zandbed, 20% op het groene buitenverblijf en 5% in de graasweiden (Bos *et al.*, 2009). Met deze verwachting en de gegevens van het standaardbedrijf uit Tabel 1 is te berekenen hoeveel feces en urine per koe er op de vier locaties terecht komt. De waarden zijn geplaatst in Tabel 25 en te gebruiken voor berekening van de grootte van emissies. Er vindt verwaarlozing plaats van meespoelend regenwater of van meegenomen zand, omdat onduidelijk is welke hoeveelheden hiervan zullen meestromen.

Tabel 25: De hoeveelheid feces en urine die per koe op de verschillende locaties terecht komt

	Dikke fractie	Dunne fractie	Totaal	Eenheid
Technische vloer	3900	9100	13000	$Kg \cdot koe^{-1} \cdot jaar^{-1}$
Zandbed	1950	4550	6500	$Kg \cdot koe^{-1} \cdot jaar^{-1}$
Groen buitenverblijf	1560	3640	5200	$Kg \cdot koe^{-1} \cdot jaar^{-1}$
<i>Totaal gescheiden</i>	<i>7410</i>	<i>17290</i>		
Weide	390	910	1300	$Kg \cdot koe^{-1} \cdot jaar^{-1}$
<i>Totaal per koe</i>	<i>7800</i>	<i>18200</i>	<i>26000</i>	$Kg \cdot koe^{-1} \cdot jaar^{-1}$

4.5. Verdere verwerking scheidingsproducten

Het resultaat van het primaire scheiden van mest en urine door middel van technische vloer, zandbed of grasmat, resulteert in twee stromen: een dunne fractie van 17290 kg per koe per jaar en een dikke fractie van 7410 kg per jaar. (zie Tabel 25). Deze twee stromen dienen zo snel mogelijk in een dichte opslag verzameld te worden en/of te worden verwerkt.

4.5.1. Verwerking dikke fractie

De verkregen dikke fractie is een product waarin zich het overgrote deel van de organische stof en drogestof uit de feces van de koe bevindt. Deze stroom kan bewerkt worden door middel van vergisting. Door het hoge drogestofgehalte zal vergisting in een CSTR mogelijk resulteren in problemen met pompen en mixen (Mes *et al.*, 2003; Møller *et al.*, 2007), hoewel Möller *et al.* (2007) geen problemen ondervinden bij vergisting van een mix van drijfmest en een dikke fractie in een verhouding van 40 : 60. Maar Mes *et al.* (2003) geven aan dat bij hogere drogestofgehaltes propstroom-vergisters beter geschikt zijn (zie hoofdstuk 3.1 voor beschrijving). Möller *et al.* (2007) geven aan dat er in Denemarken vanwege lage beschikbaarheid van co-producten naar andere manieren moet worden gezocht om de opbrengst tijdens mestvergisting te verhogen. Zij hebben experimenten gedaan met thermofiele vergisting, waarbij varkensdrijfmest werd gemixt met de dikke fractie van de gescheiden mest. De varkensdrijfmest had een drogestofgehalte van 4 tot 6,6% en de vaste mest een drogestofgehalte van 21 tot 32%. Bij een verhouding van drijfmest tot vaste mest van 40:60 was het drogestofgehalte van de mix 15,5%. (Het berekende drogestofgehalte van de dikke fractie van rundveemest in Tabel 24 is ongeveer 22,4%.) Er wordt aangegeven dat een drogestofgehalte van 15,5% hoger is dan gewoonlijk als goed werkbaar wordt genomen voor CSTR's, maar dat in de experimenten geen problemen optraden. De methaanproductie bij vergisting van de mix lag boven de 0,2 m³ CH₄ per kg organische stof, wat lager was dan de productie van de referentievergister met alleen drijfmest, waar 0,3 m³ CH₄ per kg organische stof werd geproduceerd. Maar als er aan het vergistingsproces met de mix een navergister werd gekoppeld, was de gezamenlijke productie ongeveer even groot als in de referentievergister, dus 0,3 m³ CH₄ per kg organische stof. In Möller *et al.* (2007b) wordt aangegeven dat voor met een centrifuge gescheiden mest de gasopbrengst per kg organische stof 40 – 50% lager is, maar aangezien het aantal kg organische stof per volume-eenheid 5 – 15 maal zo groot is, is de methaanopbrengst per volume-eenheid 2 tot 7 maal zo groot als voor drijfmest. Tijdens vergisting van vaste mest loopt de concentratie ammoniakaal stikstof

op. Dit kan in een CSTR resulteren in remming van het vergistingsproces (Møller *et al.*, 2007). Ook zal een hoge concentratie ammoniakaal stikstof tijdens het uitrijden resulteren in emissie van ammoniak (Huijsmans *et al.*, 2007b). Dit zou kunnen betekenen dat het digestaat ter vermijding van ammoniakemissie nog een nabewerking moet ondergaan, waarbij ammoniak verwijderd wordt. Demirer *et al.* (2005) geven aan dat two-phase-vergister minder problemen heeft met remming door ammoniak, omdat de afzonderlijke stappen van het vergistingsproces worden verdeeld over twee vergisters. In een propstroom-vergister vinden de afzonderlijke vergistingsstappen ook op opeenvolgende plekken in de vergister plaats, dus wellicht zal remming door ammoniak in een propstroomvergister ook minder zijn. De hoeveelheid biogas die geproduceerd wordt per koe is afhankelijk van de opbrengst per kg organische stof. Möller *et al.* (2007) vinden voor een mix van drijfmest en vaste mest een opbrengst van 200 – 300 L CH₄ per kg organische stof. Möller *et al.* (2007b) geven voor de dikke fractie van gecentrifugeerde runderdrijfmest een gasopbrengst van 250 L CH₄ per kg organische stof. Bij een organische stof concentratie van 183,4 kg/ton en per koe 7410 kg dikke fractie, geeft dit een biogasopbrengst van 340 m³ per koe per jaar, waarbij aangenomen wordt dat het methaangehalte 60% is.

4.5.2. Verwerking dunne fractie

De dunne fractie is een zeer waterig product, dat een relatief kleine hoeveelheid drogestof en organische stof bevat. De concentraties organisch stikstof en fosfaat zijn laag. Ook de concentratie ammoniakaal stikstof is laag, ook al is het aandeel hoger dan in de dikke fractie. De lage concentratie organische stof maakt vergisting onaantrekkelijk. Maar volgens den Boer *et al.* (2008) zou de dunne fractie van primaire mestscheiding als een kunstmestvervanger aangemerkt kunnen worden, omdat maximaal 40% van de drogestof uit organische stof bestaat. Dit zou echter wel verruiming van de Europese regels betekenen. Gezien het relatief hoge aandeel ammoniakale stikstof in vergelijking met drijfmest, is de verwachting dat de stikstofwerking hoger is. Dit blijkt in de praktijk echter vaak niet zo te zijn (Haan *et al.*, 2003; Schröder *et al.*, 2007; Boer *et al.*, 2008). De Haan (2003) wijt dit voornamelijk aan N-verliezen gedurende het mesttraject, terwijl Schröder *et al.* (2007) aangeven dat niet duidelijk is wat de reden hiervoor is, maar dat er de volgende mogelijkheden zijn: extra ammoniakvervluchtiging tijdens toediening, verhoogde denitrificatie of tijdelijke vastlegging in organisch materiaal. Wellicht kan de stikstofwerking verhoogd worden door emissie-arme verwerken van de dunne fractie. Bos *et al.* (2009) noemen bijvoorbeeld het doorontwikkelen van een spaakwielbemester.

4.6. Emissies op het mesttraject bij scheiden van feces en urine

Bij scheiding van feces en urine zal emissie optreden van zowel broeikasgassen als ammoniak gedurende het mesttraject. Maar ook voor de emissies tijdens en als gevolg van mestscheiding zijn weinig gegevens bekend (Huijsmans *et al.*, 2007). Dat betekent dat aannames gedaan moeten worden op basis van vergelijkbare situaties als geen gegevens beschikbaar zijn. Figuur 6 bevat de schematische weergave van het mesttraject bij scheiden van feces en urine en geeft ook duidelijk de bronnen van emissie weer.

4.5.1. Emissie van broeikasgassen

De emissie van broeikasgassen vanuit de koe zelf zal niet veranderen door scheiding van feces en urine. 5% van de feces en urine moet aan beweiding toegeschreven worden, deze mest wordt niet (gescheiden) opgevangen. Dit is een hoeveelheid van 1300 kg feces en urine per koe per jaar. In het drijfmeststelsel kwam 5000 kg in de wei terecht. Dit betekent dat de

hoeveelheid weidemest ongeveer vier maal zo klein is. Aangenomen kan worden dat dus ook de emissie van broeikasgassen door beweiding vier maal zo klein is.

Emissie van CH₄ bij scheiding van feces en urine

Vanaf de technische vloer, het zandbed en het groene buitenverblijf dienen feces en urine zo snel mogelijk naar de opslag of vergister te worden afgevoerd. Aangenomen wordt dat de emissie hierdoor vergelijkbaar is met het systeem met mestvergisting, waar drijfmest zo snel mogelijk vanuit de kelder naar de vergister moet. Genoemd is dat Zwart *et al.* (2006) aannemen dat de emissie van methaan, lachgas en ammoniak 5% is van de emissie bij lang opgeslagen mest als mest snel wordt doorgevoerd naar de vergister. De emissie van methaan vanaf de oppervlakken van de drie gebieden wordt dus gelijk gesteld aan de emissie van drijfmest voordat het vergist wordt. Voor emissie van methaan tijdens vergisting van de vaste fractie wordt een lekverlies van 5% aangenomen, zoals aangegeven voor drijfmestvergisting door Mol *et al.* (2004). Berekend is dat per koe 340 m³ biogas ontstaat dat voor 60% bestaat uit methaan met een dichtheid van 0,654 kg per m³. Er ontstaat dus 133,4 kg methaan, waarvan 6,7 kg ontsnapt. Er wordt aangenomen dat er door opslag en bewerking van de dunne fractie geen CH₄ emitteert. Het organische stof gehalte is dermate laag dat het ontstaan van methaan niet of nauwelijks zal optreden. In het drijfmestsysteem trad geen methaanemissie op door beweiden. Dat gebeurt hier dus ook niet. Voor uitrijden van de dunne fractie wordt aangenomen dat geen methaan ontstaat, omdat het organische stof gehalte laag is en de vloeistof snel infiltreert. Voor de dikke fractie wordt aangenomen dat de emissie gelijk is aan de emissie bij uitrijden van drijfmest en vergiste drijfmest. In Tabel 26 zijn de resultaten samengevoegd.

Tabel 26: Methaanemissie in kg per koe per jaar op het mesttraject bij scheiden van feces en urine

	Methaanemissie in kg per koe per jaar	
	Dikke fractie	Dunne fractie
Kg CH ₄ per koe per jaar door pensfermentatie	125	
Kg CH ₄ per koe per jaar door vanaf oppervlakken	2,1	
Kg CH ₄ per koe per jaar door mestvergister	6,4	-
Kg CH ₄ per koe per jaar door bewerken dunne fractie	-	0
Kg CH ₄ per koe per jaar door beweiden	0	0
Kg CH ₄ per koe per jaar door uitrijden meststof	2	0
Totaal kg CH ₄ per koe per jaar	135,5	

Emissie van N₂O bij scheiding van feces en urine

Voor lachgasemissie vanaf de technische vloer, groene buitenverblijf en zandbed wordt aangenomen dat de emissie 5% is van die van lang opgeslagen drijfmest, zoals hierboven ook is gedaan. Er wordt aangenomen dat er tijdens opslag en bewerking van de dunne fractie geen lachgas emitteert, omdat hiervoor aerobe en anaerobe omstandigheden zich dicht bij elkaar moeten bevinden (Dinuccio *et al.*, 2007). Door het lage drogestofgehalte is kans op vorming van drijfslagen, waar dit kan optreden klein. Over emissie van lachgas bij uitrijden van dikke en dunne fractie geen informatie te vinden. Wel treedt vorming van lachgas ook op tijdens nitrificatie en denitrificatie processen. Het kan zo zijn dat deze processen minder plaatsvinden doordat al veel stikstof als minerale stikstof beschikbaar is. Vanwege de onzekerheid is

dezelfde waarde genomen als bij het drijfmeststelsel, omdat de potentiële lachgasvorming nog steeds even groot is, doordat alle nutriënten nog aanwezig zijn.

Tabel 27: Lachgasemissie in kg per koe per jaar op het mesttraject bij scheiding van feces en urine

	Lachemissie in kg per koe per jaar	
	Dikke fractie	Dunne fractie
Kg N ₂ O per koe per jaar vanaf oppervlakken	0,0085	
Kg N ₂ O per koe per jaar door mestvergister	Onbekend	-
Kg CH ₄ per koe per jaar door bewerken dunne fractie	-	Onbekend
Kg N ₂ O per koe per jaar door beweiden	0,17	
Kg N ₂ O per koe per jaar door uitrijden meststof	1,82	
Totaal kg N ₂ O per koe per jaar	2,0	

Emissie van CO₂ bij scheiding van feces en urine

De emissie van koolstofdioxide vanuit de koe zal door scheiden van mest niet veranderen. Voor de emissie vanaf de drie locaties wordt verondersteld dat dit 5% is van de emissie van lang opgeslagen mest. Door vergisting ontstaat biogas, dat 40% CO₂ bevat. Dit verdwijnt uiteindelijk allemaal naar de omgeving. Ook wordt methaan door verbranding omgezet in CO₂. Er ontstaat 340 m³ biogas. De dichtheid van CO₂ is 1,799 kg/m³ en bij verbranding van 1 kg CH₄ ontstaat 2,75 kg CO₂. Er emitteert dus $340 \cdot 0,4 \cdot 1,799 + 340 \cdot 0,95 \cdot 0,6 \cdot 2,75 = 778$ kg CO₂ door vergisting. Onbekend is hoeveel CO₂ zal ontstaan als gevolg van opslag en bewerking van de dunne fractie. Als er CO₂ ontstaat zal dit zijn door verbruik van energie, maar de hoeveelheid zal verwaarloosbaar zijn ten opzichte van emissie door vergisting. Voor CO₂-emissie na toediening van de beide fracties zijn geen gegevens beschikbaar. De emissie is sterk afhankelijk van de gebruikte methode, omdat de emissie het gevolg is van verbruik van benodigde energie. Aangenomen wordt dat zodebemesting niet zal worden toegepast, omdat de beide fracties niet geschikt zijn voor zodebemesting. Bos *et al.* (2009) geven aan dat het wellicht een optie is om vaker en preciezer te bemesten. Dat zou betekenen dat per keer minder energie wordt gebruikt, maar dat dit vaker gebeurt, zodat de uiteindelijke hoeveelheid gebruikte energie gelijk is. Vanwege de onduidelijkheid zal dezelfde waarde genomen worden als in het drijfmeststelsel. Zie Tabel 28 voor gevonden waarden.

Emissie broeikasgas in CO₂-equivalenten bij scheiden van feces en urine

Nu de afzonderlijke waarden van methaan, lachgas en koolstofdioxide bekend zijn, kan berekend worden wat de totale broeikasgasemissie is bij scheiden van feces en urine. Hiervoor worden de gegevens uit tabellen 26 tot en met 28 en de global warming potentials van de afzonderlijke gassen gebruikt (Tabel 2). De broeikasgasemissies zijn geplaatst in Tabel 29.

Tabel 28: koolstofdioxide-emissie in kg per koe per jaar op het mesttraject bij scheiden van feces en urine

CO ₂ -emissie	CO ₂ -emissie in kg per koe per jaar	
	Dikke fractie	Dunne fractie
Totaal kg CO ₂ per koe per jaar door koe	4000	
Kg CO ₂ per koe per jaar vanaf oppervlakken	82,5	
Kg CO ₂ per koe per jaar door mestvergister	778	-
Kg CO ₂ per koe per jaar door bewerken dunne fractie	-	0
Kg CO ₂ per koe per jaar door toediening meststof	81,9	
Totale emissie per koe per jaar	4942	

Tabel 29: Totale broeikasgasemissie bij scheiden van feces en urine, de bijdrage van de afzonderlijke gassen in procenten en de bijdrage per bron aan de totale emissie

	Broeikasgasemissie in CO ₂ -equivalenten door scheiden van feces en urine				
	CH ₄ %	N ₂ O %	CO ₂ %	CO ₂ -equiv. [kg · koe ⁻¹ · jaar ⁻¹]	Bijdrage per bron
Emissie vanuit koe	39,6	0	60,4	6625	78,6%
Emissie vanaf oppervlakken	34,1	2,0	63,8	129	1,5%
Emissie door vergisting dikke fractie	14,7	0	85,3	912	10,8%
Emissie door bewerken dunne fractie	0	0	0	0	0%
Emissie door beweiden	0	100	0	53	0,6%
Emissie door toediening meststof	6,1	82,0	11,9	688	8,2%
Totale emissie per koe per jaar	34,0	7,4	58,6	8428	100%

4.5.1. Emissie van ammoniak

Door scheiden van feces en urine zijn er twee stromen die allebei kunnen resulteren in emissie van ammoniak. Beide fracties bevatten een hoeveelheid ammoniaktaal stikstof, dat gemakkelijk kan vervluchtigen. Vanuit de koe vindt geen emissie plaats. Voor emissie uit de drie gebieden wordt 5% genomen van de emissie uit lang opgeslagen mest. Onbekend is of en hoeveel emissie optreedt bij vergisting van de vaste fractie. Ook voor verwerking van de dunne fractie zijn geen gegevens bekend. De emissie tijdens toediening van de beide fracties is sterk afhankelijk van de methode van toediening. Als de vaste fractie breedwerpig wordt uitgereden, geven Huijsmans *et al.* (2007b) daarvoor een emissie van 65% van TAN. Per koe is er 7410 kg vaste fractie per jaar uit te rijden. Voor vergisting is het TAN-gehalte 1,7 kg/ton. Uitgaande van een stijging tot 2,0 kg/ton door vergisting, is de ammoniakemissie $7,410 \cdot 2,0 \cdot 0,65 = 9,6$ kg.

Voor de dunne fractie zijn geen cijfers bekend, maar Hees *et al.* (2007) geven aan dat bij uitrijden van kunstmest 10% van totaal N emitteert als ammoniak. De dunne fractie zal snel infiltreren, dus er zal minder emissie zijn dan bij kunstmest. Als 5% van totaal N genomen wordt betekent dat een emissie van $0,05 \cdot 17,300 \text{ ton} \cdot 3,3 \text{ kg N per ton} = 2,8$ kg ammoniak per koe per jaar. De totale emissie per koe per jaar is in ieder geval zo groot als de som van de gevonden waarden. Zie Tabel 30.

Tabel 30: Ammoniakemissie bij scheiden van feces en urine

	NH ₃ -emissie in kg per koe per jaar	
	Dikke fractie	Dunne fractie
Totaal kg NH ₃ per koe per jaar door koe	0	0
Kg NH ₃ per koe per jaar vanaf oppervlakken	0,5	
Kg NH ₃ per koe per jaar door vergisting dikke fractie	Onbekend	-
Kg NH ₃ per koe per jaar door bewerken dunne fractie	-	Onbekend
Kg NH ₃ per koe per jaar door beweiding	0,3	
Kg NH ₃ per koe per jaar door toediening meststoffen	9,6	2,8
Totale NH ₃ emissie per koe per jaar	> 13,2	

4.7. Bruikbaarheid en effectiviteit van de scheidingsproducten als meststof

De twee producten van primaire mestscheiding hebben een aantal eigenschappen die ze geschikt maken als meststof. Allereerst zijn door scheiding van feces en urine ook de nutriënten gescheiden. Fosfaat en drogestof bevinden zich voornamelijk in de dikke fractie, terwijl de dunne fractie vooral stikstof en kaliumoxide bevat. Dit betekent dat er gericht bemest kan worden op de behoeften van het gewas. Daarnaast maakt vooral de hoge vloeibaarheid van de dunne fractie regelmatige toediening erg gemakkelijk verwerkbaar (Haan *et al.*, 2003). Het digestaat van de dikke fractie is breedwerpig uit te rijden, maar de vraag is of dat verstandig is in verband met de ammoniakemissie (Haan *et al.*, 2003; Huijsmans *et al.*, 2007). Toch is de samenstelling van de beide producten nog erg wisselend en in die zin is de voorspelbaarheid nog niet zo optimaal als de voorspelbaarheid van kunstmest (Boer *et al.*, 2008).

4.8. Conclusie

Scheiden van feces en urine kan op verschillende manieren gedaan worden. Op basis van scheidingsrendement is primaire mestscheiding een goede scheidingsmethode.

Door mestscheiden ontstaan twee fracties. Ongeveer een derde van het volume is een dikke fractie waarin zich ongeveer 77% van de drogestof bevindt. Ook het grootste deel van het fosfaat en het organisch gebonden stikstof en ongeveer de helft van het kalium bevindt zich in de dikke fractie. Ongeveer twee derde van het volume is een dunne fractie, waarin zich de resterende 23% van de drogestof bevindt. Daarnaast bevat de dunne fractie het grootste deel van de ammoniakale stikstof, de andere helft van het kalium en kleine hoeveelheden fosfaat en organisch gebonden stikstof.

Door deze verdeling is de dikke fractie geschikt om te vergisten. De potentiële gasopbrengst per volume-eenheid is 2 tot 10 maal groter dan bij vergisting van drijfmest. Het drogestofgehalte is ongeveer 23%, daarom dient vergisting te gebeuren doormiddel van een propstroom-vergister.

De dunne fractie is door het lage drogestofgehalte en de hoge concentratie ammoniakaal stikstof te beschouwen als een kunstmestvervanger, waarmee gericht op stikstofbehoefte van het gewas bemest kan worden.

Ook dit mesttraject resulteert in emissie van broeikasgassen en ammoniak. Er is echter veel onzekerheid over deze cijfers, omdat het aantal bronnen zeer beperkt is.

Voor broeikasgassen geldt dat ten opzichte van het drijfmeststelsel de emissie vanuit de koe niet is gewijzigd. De bijdrage van emissies vanuit de koe aan de totale emissie is 78,6%. Dit is verreweg de grootste bijdrage. Lekverliezen bij vergisting en emissies als gevolg van verbranding van methaan dragen voor 10,8% bij, terwijl verwerken van de dunne fractie niet in emissie resulteert. Toediening van digestaat en dunne fractie draagt 8,2% bij aan het totaal. Emissie vanaf de technische vloer, het groene buitenverblijf en het zandbed draagt voor 1,5% bij aan de totale emissie. Bijdrage van beweiding is erg klein, 0,6%, doordat koeien zo kort mogelijk op de grasweiden verblijven.

Voor ammoniak is de onzekerheid groter dan voor de broeikasgassen. Voor vergisting van de dikke fractie en verwerken van de dunne fractie is niet bekend wat de ammoniakemissies zijn. Wel is een schatting gemaakt voor emissie door toediening van dikke en dunne fracties, voor emissie vanuit de drie gebieden en voor emissie door beweiding. Deze dragen respectievelijk 72,7%, 21,2%, 3,8% en 2,3% bij aan de minimale ammoniakemissie van 13,2 kg per koe per jaar. Duidelijk is dat toediening van vooral het digestaat en grote bijdrage levert.

5. Discussie

Voor de drie onderzochte systemen zijn waarden gevonden voor broeikasgas- en ammoniakemissies. Voor vergelijking zijn deze waarden samengevoegd in Tabel 31.

De totale broeikasgasemissie voor het drijfmeststelsel is 10133 kg CO₂-equivalenten per koe per jaar. Emissie bij vergisting van drijfmest is 8778 kg CO₂-equivalenten per koe per jaar, voor scheiden van feces en urine is dit 8428 kg. Ten opzichte van drijfmest is dit een reductie van respectievelijk 13,4% en 16,8%. De reductie door scheiden van feces en urine ten opzichte van vergisting is klein, namelijk 4%. Bos *et al.* (2009) verwachten door de ideeën van ‘Kracht van Koeien’ broeikasgasemissie te kunnen reduceren met 50 – 75%. Dat is een veel sterkere reductie dan hier voor het mesttraject alleen gevonden wordt. Hier kunnen diverse redenen voor zijn. Allereerst wordt in dit onderzoek consequent de emissie vanuit de koe meegenomen. Dit zorgt voor 65 tot 79% van de totaal broeikasgasemissie. Hiervan is ongeveer 60% het gevolg van CO₂-emissie door respiratie en pensfermentatie. Deze emissie is vrijwel niet te beïnvloeden en wordt vaak ook niet meegenomen in berekeningen. Als in onderstaande tabel de CO₂-emissie vanuit de koe genegeerd wordt, geeft dat de volgende emissies voor respectievelijk drijfmest, vergisting van drijfmest en scheiden: 6132, 4777 en 4427 kg CO₂-equivalenten per koe per jaar (vergelijk Tabel 21 en Tabel 29). De reductie ten opzichte van het drijfmeststelsel is dan voor vergisting 22% en voor scheiden 28%.

Tabel 31: Emissie van broeikasgas in CO₂-equivalenten, de bijdrage per van CH₄, N₂O en CO₂ afzonderlijk en de bijdrage per bron voor de drie systemen

	Waarde per mesttraject			Eenheid
	Drijfmest	Vergisting drijfmest	Scheiden feces&urine	
Totaal broeikasgasemissie	10133	8778	8428	kg CO ₂ -eq per koe per jaar
Reductie ten opzichte van drijfmest	0%	13,4%	16,8%	
Bijdrage Afzonderlijke gassen				
Methaan	35,2	33,3	34,0	%
Lachgas	8,2	8,9	7,4	%
Koolstofdioxide	56,6	57,8	58,6	%
Bijdrage per bron				
Emissie vanuit koe	65,4	75,5	78,6	%
Mestopslag in mestkelder	23,6	1,5	-	%
Mestopslag in afged.buitenopslag	2,1			%
Vanaf tech.vloer,zandbed&gras	-	-	1,5	
Emissie door vergister(s)	-	12,8	10,8	%
Verwerken dunne fractie	-	-	0	%
Emissie door beweiding	2,1	2,4	0,6	%
Emissie door uitrijden mest	6,8	7,8	8,2	%
Totaal Ammoniakemissie	23,8	onbekend	> 13,2	kg NH ₃ per koe per jaar
Bijdrage per bron				
Emissie vanuit koe	0	0	0	kg NH ₃ per koe per jaar
Mestopslag in mestkelder	10,0	0,5	-	
Mestopslag in afged.buitenopslag	0,6	-	-	
Vanaf tech.vloer,zandbed&gras	-	-	0,5	
Emissie door vergister(s)	-	onbekend	onbekend	
Verwerken dunne fractie	-	-	onbekend	
Emissie door beweiding	1,2	1,2	0,3	
Emissie door uitrijden mest	12	onbekend	12,4	

Verder zijn geen of weinig gegevens bekend voor emissie vanaf een zandbed of grasmat of voor emissie na uitrijden van beide fracties. Een emissie-armere manier van uitrijden van beide fracties kan de resultaten verbeteren.

Er is slechts weinig verschil in broeikasgasemissie tussen vergisting van drijfmest en scheiden van feces en urine. De reductie komt vooral doordat minder grote volumes vergist worden en minder biogas wordt geproduceerd, waardoor minder lekverlies plaatsvindt en doordat de koeien weinig tijd op het weideland doorbrengen. Verder zijn de vergelijkbare waarden te verklaren doordat voor scheiden deels de zelfde aannames zijn gedaan als bij vergisting van drijfmest. Het is niet zeker dat deze aannames voor scheiden ook juist zijn, maar het zijn de best mogelijke aannames, bij gebrek aan concrete gegevens voor dit systeem.

Het aandeel van de drie afzonderlijke broeikasgassen in de totale emissie verschilt slechts weinig voor de drie systemen. Voor methaan ligt het aandeel tussen 33,3 en 35,2%, voor lachgas tussen 7,4 en 8,2% en voor koolstofdioxide tussen 56,6 en 58,6%. Voornamelijk als gevolg van vergisting van zowel drijfmest als van de vaste fractie, daalt het aandeel methaan en stijgt het aandeel koolstofdioxide enigszins in deze systemen. Ook hier geldt dat het meenemen van de emissie vanuit de koe een dempend effect heeft op de andere waarden. Opvallend is dat het aandeel van lachgas bij vergisting van drijfmest stijgt ten opzichte van het drijfmestsysteem, terwijl bij scheiden het aandeel lachgas daalt. Dit komt doordat er vanuit wordt gegaan dat het beweidingregime niet verandert bij vergisting van drijfmest, terwijl bij scheiden van feces en urine de koeien veel minder tijd in het weideland doorbrengen. Bij vergisting van drijfmest is er absoluut wel een lichte daling, als gevolg van het korte verblijf van mest in de mestkelder (zie Tabel 19).

Voor ammoniakemissie zijn alleen voor het drijfmestsysteem voldoende waarden gevonden, namelijk 23,8 kg NH₃ per koe per jaar. De emissie van ammoniak door vergisting van drijfmest en dikke fractie, door verwerken van de dunne fractie en door het uitrijden van vergiste drijfmest is onbekend. Dat maakt het trekken van een conclusie onmogelijk. Voor scheiden van feces en urine is bekend dat de ammoniakemissie hoger is dan 13,2 kg per koe per jaar. De emissie door de vergister(s) is naar verwachting niet groot. Als bij verwerken van de dunne fractie emissie vermeden kan worden door gebruik van een luchtwasser, is er een grote kans dat de totale emissie voor dit systeem lager is dan voor het drijfmestsysteem. Uitrijden van de beide fracties heeft een groot aandeel in de totale emissie. De aanname is dat de dikke fractie bovengronds wordt uitgereden, waardoor 9,6 kg NH₃ emitteert (zie Tabel 30). Een andere manier van uitrijden van de fracties kan dit wellicht verminderen, waardoor een grotere totale reductie bereikt kan worden.

Voor berekening van emissies is er steeds vanuit gegaan dat de samenstelling van de mest niet veranderde door eerdere emissies. Dit is in de praktijk niet het geval. Emissie van methaan en koolstofdioxide resulteert in verlaging van de koolstofconcentratie en emissie van lachgas en ammoniak in een verlaging van de stikstofconcentratie. Hiermee rekenen vraagt echter om een modelmatige aanpak. Dat was niet het doel van dit onderzoek. Verder is er consequent op deze manier gewerkt, dus vergelijking van de drie systemen is goed mogelijk. Wel kunnen berekende emissies dus hoger zijn dan wanneer op een modelmatige manier is gewerkt.

In dit onderzoek is alleen gerekend aan de directe emissie van broeikasgassen en ammoniak op het mesttraject. Het mesttraject is onderdeel van een groter systeem waarin ook emissie of emissiereductie plaatsvindt, die kan afhangen van het mesttraject. Vergisting van drijfmest of van de dikke fractie kan bijvoorbeeld resulteren in vermijden van emissies ergens anders in het systeem. Hier is geen rekening mee gehouden in het vergelijken van de drie systemen.

Co-vergisting is in dit onderzoek uiteindelijk niet doorgerekend. Hier zijn twee redenen voor:

- emissie als gevolg van co-vergisting is erg complex, omdat co-vergisting met verschillende co-producten en verschillende verhoudingen gedaan kan worden. Elke samenstelling leidt tot een ander proces met bijvoorbeeld een andere biogasopbrengst;
- Er is vrijwel geen literatuur te vinden die emissies als gevolg van co-vergisting kwantificeert.

6. Conclusie

Om een antwoord te kunnen geven op de vraag of gescheiden inzamelen en verwerken van feces en urine kan bijdragen aan vermindering van de uitstoot van schadelijke stoffen in de melkveehouderij en wat het effect van scheiden is op de bruikbaarheid als meststof, zijn drie systemen vergeleken. Het algemeen toegepaste systeem van samenvoegen van feces en urine en opslaan als drijfmest, vergisting van drijfmest en een systeem waarbij feces en urine gescheiden worden volgens ideeën uit het project 'Kracht van Koeien'. Het drijfmestsysteem fungeert hierbij als referentie.

In het drijfmestsysteem is de totale broeikasgasemissie 10133 kg CO₂-equivalenten per koe per jaar. Vergisting van drijfmest geeft een emissie van 8778 kg CO₂-equivalenten. Dat is een reductie van 13,4%. De emissie bij scheiden van feces en urine is 8428 kg CO₂-equivalenten per koe per jaar. Dit is een reductie van 16,8% ten opzichte van het drijfmestsysteem. Ten opzichte van vergisten van drijfmest geeft scheiden van feces en urine een geringe emissiereductie van 4%.

Ammoniakemissie voor het drijfmestsysteem bedraagt 23,8 kg ammoniak per koe per jaar. Het effect van vergisten van drijfmest en scheiden van feces en urine op de ammoniakemissie is onbekend. Wel vindt er een reductie plaats door vermijden van langdurige opslag van mest, maar door ontbreken van gegevens van emissie als gevolg van uitrijden van de meststoffen, is niet duidelijk of het gehele systeem ook in reductie resulteert.

Digestaat van vergiste drijfmest is effectiever en bruikbaarder als meststof doordat het meer vloeibaar is en meer ammoniakale stikstof bevat. Maar de verhouding van de nutriënten sluit net als bij drijfmest, vaak niet aan op de behoeften van het gewas. Scheiden van feces en urine resulteert in een fosfaatrijke dikke fractie en een stikstofrijke dunne fractie. Met deze fracties kan gerichter bemest worden op de behoeften van het gewas en de bruikbaarheid is beter dan drijfmest en digestaat.

7. Aanbevelingen

Voor verder onderzoek zijn een aantal aanbevelingen te geven:

- Om vergelijking van onderzoeksresultaten te vergemakkelijken zouden voor het kwantificeren van emissies van schadelijke stoffen uit de landbouw standardeenheden gebruikt moeten worden;
- Scheiding van mest volgens de ideeën van 'Kracht van Koeien' moet praktisch getest worden. Het is onduidelijk of gebruik van drainagesystemen onder zandbedden en onder gras goed werkt voor het verzamelen van urine;
- Zowel voor (co-)vergisting van drijfmest als voor mestscheiding moet experimenteel onderzoek verricht worden naar emissie van ammoniak en broeikasgassen tijdens het mesttraject;
- In dit onderzoek is gekeken naar de directe emissies als gevolg van mestscheiding volgens de ideeën van 'Kracht van Koeien'. Dit moet uitgebreid worden met kwantitatief onderzoek naar het gehele systeem: worden bijvoorbeeld indirect emissies vermeden en hoeveel kan bespaard worden op kunstmestgebruik;
- Voor het systeem van scheiden van feces en urine moeten concrete ideeën uitgewerkt worden voor het verwerken van de dunne fractie en voor de wijze van toedienen als meststof van beide fracties

Referenties

- Akker, H.v.d., Ruijter, F.d., 2005. Mest- en mineralenkennis voor de praktijk.
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Amon, T., Zechmeister-Boltenstern, S., 2006. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agriculture, ecosystems & environment* v. 112, no. 2-3, 153-162.
- BiogaS, 2009. In: 4GreenEnergy2.
- Bodemacademie, 2009. In: <http://www.bodemacademie.nl/>.
- Boer, D.J.d., Dijk, T.A.v., Draai, H.v.d., 2008. Bewerken rundveemest tot kunstmestvervangers; perspectieven voor de melkveehouderij. Nutriënten Management Instituut NMI B.V., Oosterbeek.
- Boer, H.C.d., 2004. Stikstoflevering uit onvergiste en vergiste runderdrijfmest na zodebemesting van grasland op zware zeeklei = Nitrogen supply from raw and anaerobically digested cattle slurry injected shallowly into grassland on heavy sea clay. *Animal Sciences Group Praktijkonderzoek*, Lelystad.
- Boer, H.C.d., Timmerman, M., 2006. Stikstofopname door gras uit vijf co-vergiste varkensdrijfmesten in een geconditioneerde potproef. *Animal Sciences Group Wageningen UR*, Lelystad.
- Bos, B., Cornelissen, J., Groot Koerkamp, P., Mittelmeijer, M., Ursinus, W.W., 2009. Kracht van Koeien : springplank naar een duurzame veehouderij : hoe dierenwelzijn, milieu en economie elkaar kunnen versterken in de melkveehouderij. *Wageningen UR Animal Sciences Group*, Lelystad.
- Buijsman, E., Hammingh, P., Jimmink, B., Koelemeijer, R., Matthijsen, J., Ruiters, J.d., Velders, G., Velze, K.v., 2004. Jaaroverzicht luchtkwaliteit 2002. RIVM, Bilthoven.
- CBS, 2009. Statline. Centraal Bureau voor de Statistiek, Den Haag / Heerlen.
- Demirer, G.N., Chen, S., 2005. Two-phase anaerobic digestion of unscreened dairy manure. *Process biochemistry* v. 40, no. 11, 3542-3549.
- Dinuccio, E., Berg, W., Balsari, P., 2007. Gaseous emissions from the storage of untreated slurries and the fractions obtained after mechanical separation. *Grugliasco*.
- Dooren, H.J.C.v., Smits, M.C.J., 2007. Reductieopties voor ammoniak- en methaanemissie uit huisvesting voor melkvee = Reduction options of ammonia and methane emissions from dairy housing. *Wageningen UR Animal Sciences Group*, Lelystad.
- Elferink, E., Wel, E.v., Hees, E., Schans, D.A.v.d., 2008. Klimaatlat melkveehouderij: Gebruikershandleiding. *CLM Onderzoek en Advies BV*, Culemborg.
- Haan, M.H.A.d., Evers, A.G., Holshof, G., Blanken, K., 2003. Vier jaar primaire mestscheiding op het lagekostenbedrijf = Four years primary manure solids separation on the low cost farm. *Praktijkonderzoek Veehouderij*, Lelystad.
- Haperen, P.F.v., Verdoes, N., Jacobs, J.G.M., 2009. Duurzame mestvergistings Aalten. *Wetenschapswinkel Wageningen UR*, Wageningen.
- Hees, E., Kool, A., Zevenbergen, M.v., Blok, M., 2007. Melken voor het klimaat : op zoek naar een klimaat vriendelijke melkveehouderij in de Alblasserwaard. *CLM Onderzoek en Advies*, Culemborg.
- Huijsmans, J.F.M., Mosquera, J., 2007. Ammoniakemissies bij het uitrijden van verwerkte mest. *Plant Research International Wageningen*.
- Huijsmans, J.F.M., Mosquera, J., Hol, J.M.G., 2007b. Ammoniakemissie bij het uitrijden van vaste mest. *Plant Research International*, Wageningen.
- Huis in 't Veld, J.W.H., Monteny, G.J., 2003. Methaanemissie uit natuurlijke geventileerde melkveestallen = Methane emission from cubicle housing systems for dairy cows. *Imag*, Wageningen.

- Kuikman, P.J., Oudendag, D.A., Smit, A., Hock, K.W.v.d., 2005. ROB maatregelen in de landbouw en vermindering van emissies van broeikasgassen : zichtbaarheid van effecten in de nationale berekening en suggesties ter verbetering van de berekeningssystematiek. Alterra, Wageningen.
- LEI, 2009. BINternet. Landbouw Economisch Instituut, Wageningen.
- Lent, A.J.H.v., Dooren, H.J.C.v., 2001. Perspectieven mestvergistings op Nederlandse melkvee- en varkensbedrijven. Praktijkonderzoek Veehouderij, Lelystad.
- LNV, 2008. Uitvoeringsregeling Meststoffenwet, Artikel 4, Bijlage Aa.
- LNV, Verburg, G., Cramer, J.M., Hoeven, M.J.A.v.d., Jager, J.C.d., 2008. Convenant 'Schone en Zuinige Agrosectoren' (versie 1.0). Den Haag.
- Melse, R.W., Buissonjé, F.E.d., Verdoes, N., Willers, H.C., 2004. Quick scan van be- en verwerkingstechnieken voor dierlijke mest. Animal Sciences Group / Praktijkonderzoek, Lelystad.
- Mes, T.Z.D.d., Stams, A.J.M., Reith, J.H., Zeeman, G., 2003. Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes. In: Dutch Biological Hydrogen Foundation.
- Meuffels, G., Geel, W.v., Haan, J.d., Verstegen, H., 2007. Gebruik van varkensdrijfmestdigestaat in de akkerbouw : demo, uitgevoerd voor ZLTO op proefboerderij Vredepeel binnen het project Nutriënten Waterproof. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving Akkerbouw Groene Ruimte en Vollegrondsgroenten, Wageningen.
- MNC, 2009. Milieu- en Natuurcompendium, www.milieuennatuurcompendium.nl In: PBL, Bilthoven; CBS, Den Haag; WUR, Wageningen.
- Mol, R.M.d., Hilhorst, M.A., 2003. Methaan-, lachgas- en ammoniakemissies bij productie, opslag en transport van mest. Imag, Wageningen.
- Mol, R.M.d., Hilhorst, M.A., 2004. Emissiereductieopties voor methaan uit mestopslagen. Agrotechnology & Food Innovations, Wageningen.
- Møller, H.B., Hansen, J.D., Sorensen, C.A.G., 2007b. Nutrient Recovery by Solid-Liquid Separation and Methane Productivity of Solids. Transactions of the ASABE v. 50, no. 1, 193-200.
- Møller, H.B., Nielsen, A.M., Nakakubo, R., Olsen, H.J., 2007. Process performance of biogas digesters incorporating pre-separated manure. Livestock science v. 112, issue 3, 217-223.
- Mosquera, J., Hol, J.M.G., 2007. Gasvormige emissies na toediening van vergiste mest op grasland = Gaseous emissions after the application of digested manure to grassland. Animal Sciences Group, Lelystad.
- Nijssen, J.M.A., Antuma, S.J.F., Scheppingen, A.T.J.v., 1997. Perspectieven mestvergistings op Nederlandse melkveebedrijven. Praktijkonderzoek Rundvee Schapen en Paarden, Lelystad.
- Perdok, H.B., Panneman, H., Wijk, D.v., Haeringen, W.A.v., Fokkink, W.B., Fonken, B.C.J., Newbold, J.R., 2007. Protozoa inhibitors to reduce methane excretion from dairy cows.
- Schooten, H.A.v., 2005. Betere benutting eigen stikstof; Verslag van demo's 2004.
- Schooten, H.A.v., Eekeren, N.v., Hanegraaf, M.C., Burgt, G.J.v.d., Visser, M.d., 2006. Effect meerjarige toepassing groenbemester en organische mest op bodemkwaliteit bij continueelt mais** : 2e rapport project Zorg voor Zand = Effect of long-term application of cover crops and organic manure on soil quality in a continuous maize production system : 2nd report project Care for Sand. Animal Sciences Group, Lelystad.
- Schröder, J.J., Uenk, D., Middelkoop, J.C.v., 2007. Bemestingswaarde van mestscheidingsproducten: theorie en praktijk. Plant Research International, Wageningen.

- Sebek, L.B.J., Schils, R.L.M., 2006. Verlaging van methaan- en lachgasemissie uit de Nederlandse melkveehouderij : implementatie van reductiemaatregelen op praktijkbedrijven binnen project Koeien & Kansen. Animal Sciences Group, [Lelystad].
- Senternovem, 2007. Toelichting milieu-effect fakkel bij mestvergistingsinstallatie. In: Smink, W., Hoek, K.W.v.d., Bannink, A., Dijkstra, J., 2005. Calculation of methane production from enteric fermentation in dairy cows. SenterNovem, Utrecht.
- Smits, M.C.J., 2002. Naar een nieuwe methodiek voor monitoring van ammoniak-emissie op regionaal niveau: haalbaarheidsstudie. Imag, Wageningen.
- Thomassen, M.A., Zwart, K.B., 2008a. Ontwikkeling duurzaamheidsmaatlat : covergisting van dierlijke mest met bijproducten = Development sustainability index co-digestion animal manure with byproducts. Animal Sciences Group, Lelystad.
- Thomassen, M.A., van Calster, K.J., Smits, M.C.J., Iepema, G.L., de Boer, I.J.M., 2008b. Life cycle assessment of conventional and organic milk production in the Netherlands. *Agricultural systems* v. 96, no. 1-3, 95-107.
- Timmerman, M., Dooren, H.J.C.v., Biewenga, G., 2005. Mestvergisting op boerderijschaal = Manure digestion on the farm. Animal Sciences Group Praktijkonderzoek, Lelystad.
- Vellinga, T., Haan, M.d., Evers, A., 2009. Vermindering van de uitstoot van broeikasgassen op het melkveebedrijf : berekeningen voor praktijkbedrijven = Decreasing greenhouse gas emissions on dairy farms. Wageningen UR Animal Sciences Group, Lelystad.
- Velthof, G.L., Bruggen, C.v., Groenestein, C.M., Haan, B.J.d., Hoogeveen, M.W., Huijsmans, J.F.M., 2009. Methodiek voor berekening van ammoniakemissie uit de landbouw in Nederland. Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, Wageningen.
- Verloop, K., Hilhorst, G., Aarts, F., 2008. Informatieblad mineralen en milieukwaliteit : terug naar 'stalmest en gier' om mestafvoer te beperken? PRI Agrosysteemkunde Wageningen UR, Wageningen.
- Verloop, K., Hilhorst, G., Hermans, A., Oenema, J., Aarts, F., 2007. Verbeterd mineralenbeheer op melkveebedrijven door mestscheiding : verkenning van de bijdrage aan de benutting van N en P aan de hand van resultaten van proefbedrijf 'De Marke'. Animal Sciences Group, Lelystad.
- Wagenberg, A.V.v., Timmerman, M., 2003. Realisatie mestvergistingsinstallatie praktijkcentrum Sterksel. Wageningen UR Animal Sciences Group, Lelystad.
- Wikipedia, 2009. In: Wikimedia Foundation Inc.
- Wilkie, A.C., 2005. Anaerobic Digestion of Dairy Manure: Design and Process Considerations. Cornell University, Ithaca, New York.
- Zwart, K., Oudendag, D., Ehlert, P., Kuikman, P., 2006. Duurzaamheid co-vergisting van dierlijke mest. Alterra, Wageningen.

Bijlagen

Bijlage I

Tabel I-0: Gebruikte bronnen in Bijlagen I en II

Nummer	Bron	Nummer	Bron
1	(Huis in 't Veld <i>et al.</i> , 2003)	6	(Elferink <i>et al.</i> , 2008)
2	(Thomassen <i>et al.</i> , 2008b)	7	(Mol <i>et al.</i> , 2003)
3	(Amon <i>et al.</i> , 2006)	8	(Velthof <i>et al.</i> , 2009)
4	(Smink <i>et al.</i> , 2005)	9	(Perdok <i>et al.</i> , 2007)
5	(Vellinga <i>et al.</i> , 2009)	10	(Hees <i>et al.</i> , 2007)

Onvereenvoudigde tabellen met de uitstoot van broeikasgassen zoals gevonden in een aantal bronnen.

Tabel I-1: Gegevens uit bronnen met betrekking tot emissie van CH₄ Methaan

Emissie CH ₄	Bronnen							
	1	2	3	4	5	7	9	10
Gram CH ₄ /dag/koe	500						400	
Range CH ₄ /dag/koe	310-710							
Kg/jaar/koe Totaal	182,5							130
% door pensfermentatie	70%							
Kg/jaar/koe door pensfermentatie	127,75	113		124,6				
Gram CH ₄ /kg melk pensferm.				15				50+0,01*(kg melk)
Gram CH ₄ /kg melk totaal					25,4		12,5	
% door mestopslag	30%		100%			100%		
Kg/jaar/koe door mestopslag	54,75							
Kg/m ³ mest door mestopslag			4,046			1,536		1,3
Kg/m ³ mest door beweiden						0,11		
Kg/m ³ mest door afgedekte buitenopslag						0,22		
Tijdens mestmanagement in gram CH ₄ /m ³ mest/jaar		1800						
Kg/ m ³ mest na uitrijden			0,0013			0,1		
Kg / jaar / pink								65
Kg / jaar / kalf								25

Tabel I-2: Omrekening van gegevens van tabel I-1 naar standaardwaarden met behulp van gegevens uit tabel 1

Huidige eenheid	Waarde	Omrekening	Resultaat	Nieuwe eenheid
Gram CH ₄ /dag/koe totaal	500	Getal · 365 / 1000	182,5	Het totaal aantal kg CH₄/ koe / jaar
	400		146,0	
	310 – 710		113,15 – 258,95	
Kg/jaar/koe Totaal	182.5	182.5		
	130	130		
Gram CH ₄ /kg melk totaal	25.4	Getal · 7800 / 1000	208.12	
	12.5		97.5	

Kg/jaar/koe door pensfermentatie	127.75 113 124.6		127.75 113 124.6	Het aantal kg CH₄/ koe / jaar door pensfermentatie
Gram CH ₄ /kg melk door pensfermentatie	15 50+0.01 · kg melk	Getal · 7800 / 1000	117 128	
Kg/jaar/koe door mestopslag	54.75		54.75	Het aantal kg CH₄/ koe / jaar door mestopslag
Kg/m ³ mest door mestopslag	4.046 1.536 1.3	Getal · 21	84.966 32.256 27.3	
Tijdens mestmanagement in gram CH ₄ /m ³ mest/jaar	1800	Getal · 21 / 1000	37.8	
Kg/m ³ mest door afgedekte buitenopslag	0.22	Getal · 21 · 0.55	2.54	
Kg/m ³ mest door beweiden	0.11	Getal · 5	0.55	Aantal kg CH₄/ koe / jaar door beweiden
Kg/ m ³ mest na uitrijden	0.0013 0.1	Getal · 21	0.0273 2.1	Aantal kg CH₄/ koe / jaar door uitrijden
Kg / jaar / pink	65		65	Het totaal aantal kg CH₄/ jaar door jongvee
Kg / jaar / kalf	25		25	

Tabel I-3: Gegevens uit bronnen met betrekking tot emissie van N₂O Lachgas

Emissie N ₂ O	Bronnen						
	1	2	3	5	7	8	10
% Emissie uit stal/kelder N ₂ O-N van totaal N	0	0,1%			0,1%	0,1%	0,005%
Kg N ₂ O-N / dier / jaar uit stal						0,001944	
Kg N ₂ O per m ³ mest uit opslag			0,0202				
% Emissie tijdens beweiding N ₂ O-N van totaal N		2%			2%		6%
Kg N ₂ O-N / dier / jaar buitenopslag						0,001029	
% Emissie uit buitenopslag					0		
Kg N ₂ O per m ³ mest na uitrijden			0,0013				
% Emissie na uitrijden mest N ₂ O-N van totaal N					1,25-2%		1%
% emissie uit opslag			84,2%				
% emissie door toepassing mest			15,8%				
% emissie door toepassing kunstmest							3%
Emissie totaal in gram/kg melk				0,688			
Emissie N ₂ O door veengrond in kg/ha				7,4			

Tabel I-4: Omrekening van gegevens van tabel I-3 naar standaardwaarden met behulp van gegevens uit tabel 1

Huidige eenheid	Waarde	Omrekening	Resultaat	Nieuwe eenheid
Emissie totaal in gram/kg melk	0,688	$\text{Getal} \cdot 7800 / 100$	5,37	Totaal aantal kg N₂O / koe / jaar
% Emissie uit stal/kelder	0	$\text{Getal} \cdot 21 \cdot 4,4 \cdot (44/28) / 100$	0	Het aantal kg N₂O / koe / jaar uit stal en kelder
N ₂ O-N van totaal N	0,1		0,1452	
Kg N ₂ O-N / dier / jaar uit stal	0,005		0,00726	
Kg N ₂ O per m ³ mest uit opslag	0,001944	$\text{Getal} \cdot (44/28)$	0,003055	
Kg N ₂ O per m ³ mest uit opslag	0,0202	$\text{Getal} \cdot 21$	0,4242	
Kg N ₂ O-N / dier / jaar buitenopslag	0,001029	$\text{Getal} \cdot 21 \cdot 0,55 \cdot (44/28)$	0,018676	Het aantal kg N₂O / koe / jaar uit buitenopslag
% Emissie uit buitenopslag	0		0	
% Emissie tijdens beweiding	2	$\text{Getal} \cdot 5 \cdot 4,4 \cdot (44/28) / 100$	0,6914	Het aantal kg N₂O / koe / jaar uit beweiden
N ₂ O-N van totaal N	6		2,0743	
Kg N ₂ O per m ³ mest na uitrijden	0,0013	$\text{Getal} \cdot 21$	0,0273	Het aantal kg N₂O / koe / jaar door uitrijden mest
% Emissie na uitrijden mest	1,25-2	$\text{Getal} \cdot 21 \cdot 4,4 \cdot (44/28) / 100$	1,815 – 2,904	
N ₂ O-N van totaal N	1		1,452	

Tabel I-5: Gegevens uit bronnen met betrekking tot emissie van CO₂ Koolstofdioxide

Emissie CO ₂ In kg CO ₂	Bronnen		
	1	3	7
Gemiddeld kg /dag/koe uit stal	15		
% toegeschreven aan koe	73%		
% toegeschreven aan opslag	27%		
Kg per m ³ mest uit opslag		91,21	
Homogenisatie mest (pompen/mixen) per m ³ mest		0,213	
Kg per m ³ mest na toediening		1,19	
Kg CO ₂ per m ³ mest na toediening met zodebemester			3,9
Kg CO ₂ per m ³ mest na toediening met Sleepvoetbem.			3
Kg CO ₂ per m ³ mest na mestinjectie in grasland			5,6
Kg CO ₂ per m ³ mest na mestinjectie in bouwland			3,9

Tabel I-6: Omrekening van gegevens van tabel I-5 naar standaardwaarden met behulp van gegevens uit tabel 1

Huidige eenheid	Waarde	Omrekening	Resultaat	Nieuwe eenheid
Kg CO ₂ /dag /koe door koe zelf	73% van 15	$15 \cdot 0,73 \cdot 365$	3996,75	Het aantal kg CO₂ / koe / jaar door koe
Kg CO ₂ /dag /koe door koe zelf	13	Getal · 365	4745	
Kg CO ₂ /dag /koe door opslag	27% van 15	$15 \cdot 0,27 \cdot 365$	1478,25	Het aantal kg CO₂ / koe / jaar door mestopslag
Kg per m ³ mest uit opslag	91,21	Getal · 21	1915,41	
Homogenisatie mest (pompen/mixen) per m ³ mest	0,213	Getal · 21	4,473	Aantal kg CO₂ / koe / jaar door homogenisatie
Kg CO ₂ per m ³ mest na toediening	1,19	Getal · 21	25	Het aantal kg CO₂ / koe / jaar door mesttoediening
Kg CO ₂ per m ³ mest na toediening verschillende methoden	3,9	Getal · 21	81,9	
	3		63	
	5,6		117,6	

Bijlage II

Tabel II-1: Onvereenvoudigde tabel met de uitstoot van ammoniak zoals gevonden in een aantal bronnen

Emissie NH ₃	Bronnen			
	3	7	8	10
Gram NH ₃ /m ³ mest opslag (Vergelijkbaar met buitenopslag?)	41			
Gram NH ₃ -N/ton totaal N mest uit stal/kelder		155		
Kg NH ₃ -N / dier / jaar uit stal			8,7	
NH ₃ verliezen als % van TAN uit stal			26,1%	
Gram NH ₃ -N/ton totaal N mest bij beweiding		80		
NH ₃ verliezen als % van TAN uit beweiding			10%	
Kg NH ₃ -N / dier / jaar uit buitenopslag			0,53	
% NH ₃ -N van TAN uit buitenopslag			1,5%	
Gram NH ₃ -N/ton totaal N mest uit afgedekte buitenopslag		9,6		
Gram NH ₃ /m ³ mest na uitrijden	185,8			
Gram NH ₃ -N/1000 kg totaal N Toediening zodebemester		115		
NH ₃ -N % van TAN na uitrijden op gras met zodebemester			19%	
Gram NH ₃ -N/1000 kg totaal N Toediening sleepvoetbemester		287,5		
NH ₃ -N % van TAN na uitrijden op gras met sleepvoetbemester			26%	
Gram NH ₃ -N/1000 kg totaal N Mestinjectie grasland		11,5		
Gram NH ₃ -N/1000 kg totaal N Mestinjectie bouwland		103,5		
NH ₃ -N % van TAN na uitrijden op bouwland direct inwerken			22%	
NH ₃ -N % van TAN na uitrijden op bouwland volledig bedekken			2%	
Emissie van N uit N kunstmest				10%
Totaal gram NH ₃ /m ³ mest	226,8			
% emissie uit opslag	18,1%			
% emissie door toepassing	81,9%			

Tabel II-2: Tabel met omrekeningen naar standaardwaarden met behulp van waarden uit tabel 1.

Huidige eenheid	Waarde	Omrekening	Resultaat	Nieuwe eenheid
Totaal gram NH ₃ /m ³ mest	226,8	$\text{Getal} \cdot 26 / 1000$	5,9	Totaal kg NH₃ / koe / jaar
Gram NH ₃ -N/ kg totaal N mest uit stal/kelder	155	$\text{Getal} \cdot 21 \cdot 4,4 \cdot 0,45 \cdot (17/14)$	7,83	Het aantal kg NH₃ / koe / jaar uit stal
Kg NH ₃ -N / dier / jaar uit stal	8,7	$\text{Getal} \cdot (17/14)$	10,56	
NH ₃ verliezen als % van TAN uit stal	26,1	$\text{Getal} \cdot 21 \cdot 2,4 / 100$	13,15	
Gram NH ₃ /m ³ mest opslag	41	$\text{Getal} \cdot 21 / 1000 \cdot 55$	0,47	Het aantal kg NH₃ / koe / jaar uit de buitenopslag
% NH ₃ -N van TAN uit buitenopslag	1,5	$\text{Getal} / 100 \cdot (17/14) \cdot 21 \cdot 0,55 \cdot 2,4$	0,51	
Gram NH ₃ -N/ kg totaal N mest uit afgedekte buitenopslag	9,6	$\text{Getal} \cdot (17/14) \cdot 21 \cdot 0,55 \cdot 4,4 / 1000$	0,59	
Gram NH ₃ -N/ kg totaal N mest bij beweiding	80	$\text{Getal} \cdot 5 \cdot 4,4 \cdot (17/14) / 1000$	1,17	Het aantal kg NH₃ / koe / jaar door beweiding
NH ₃ verliezen als % van TAN uit beweiding	10	$\text{Getal} \cdot 5 \cdot 2,4 / 100$	1,2	
Gram NH ₃ /m ³ mest na uitrijden	185,8	$\text{Getal} \cdot 21 / 1000$	3,9	
Gram NH ₃ -N/ kg totaal N bij verschillende toedieningsmethoden:				Het aantal kg NH₃ / koe / jaar door toediening van drijfmest met diverse methodes
- zodebemester		115	$\text{Getal} \cdot 21$	
- sleepvoetbemester		287,5	$\cdot 4,4$	
- Mestinjectie grasland		11,5	$\cdot (17/14) /$	
- Mestinjectie bouwland		103,5	1000	
NH ₃ -N % van TAN na uitrijden met verschillende toedieningsmethoden:				
- gras met zodebemester		19	$\text{Getal} /$	
- gras sleepvoetbemester		26	100	
- bouwland direct inwerken		22	$\cdot (17/14)$	
- bouwl. volledig bedekken		2	$\cdot 21 \cdot 2,4$	
				12,9
				32,26
				1,29
				11,61
				11,6
				15,9
				13,5
				1,22