
Verwijdering van methaan uit ventilatielucht van een drijfmestopslag met een pilot-scale biofilter

Deelrapportage van onderzoek uitgevoerd in opdracht van Novem (subsidieprogramma ROB-AGRO; projectnummer: 375102/0010) en van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij

R.W. Melse

Verwijdering van methaan uit ventilatielucht van een drijfmestopslag met een pilot-scale biofilter

R.W. Melse

april 2003

Nota P 2003-20

© 2003
Instituut voor Milieu- en Agritechniek (IMAG)
Mansholtlaan 10-12, Postbus 43, 6700 AA Wageningen
Telefoon 0317 – 476300
Telefax 0317 – 425670
www.imag.wageningen-ur.nl

Interne mededeling IMAG. Niets uit deze nota mag elders worden vermeld, of vermenigvuldigd op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van IMAG of de opdrachtgever. Bronvermelding zonder de feitelijke inhoud is evenwel toegestaan, op voorwaarde van de volledige vermelding van: auteursnaam, instituut en notanummer en de toevoeging: 'niet gepubliceerd'.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying or otherwise, without the prior written permission of IMAG.

INHOUD

SAMENVATTING	4	
SUMMARY	5	
1	INLEIDING	6
1.1	Probleemstelling	6
1.2	Doelstelling	6
1.3	Financiering en projectstructuur	6
2	EIGENSCHAPPEN VENTILATIELUCHT	8
2.1	Inleiding	8
2.2	Ventilatielucht van stallen	8
2.3	Ventilatielucht van buitengelegen mestopslagen	9
3	VOORAFGAAND ONDERZOEK	11
3.1	Inleiding	11
3.2	Principe van biologische luchtreiniging	11
3.3	Fase 1: Literatuurstudie	12
3.4	Fase 2: Microbiologisch laboratoriumonderzoek	13
3.5	Ontwerp pilot-scale biofilter	14
4	MATERIAAL EN METHODEN	15
4.1	Onderzoeksopzet	15
4.2	Beschrijving biofilter	15
4.3	Metingen en analyses	17
4.4	Samenstelling filtermateriaal	18
5	RESULTATEN EN DISCUSSIE	20
5.1	Methaanverwijdering en luchtbelasting	20
5.2	Lachgas	22
5.3	Totale hoeveelheid broeikasgassen	23
5.4	Ammoniak, waterstofsulfide en geur	26
5.5	Temperatuur en relatieve vochtigheid	27
5.6	Drukval	29
5.7	Samenstelling filtermateriaal	30

5.8	Analyse van resultaten	31
5.9	Rekenvoorbeeld	36
6	CONCLUSIES	39
7	AANBEVELINGEN VOOR NADER ONDERZOEK	40
	LITERATUUR	42

SAMENVATTING

Methaan (CH_4) is een zeer sterk broeikasgas (21 maal zo sterk als CO_2). De veehouderij is verantwoordelijk voor een betrekkelijk hoge emissie van methaan. Het doel van het onderzoek is het ontwikkelen van een biologische luchtbehandelingsinstallatie om de emissie van methaan uit mestopslagen en stallen te reduceren. Gedurende 2 maanden wordt in een biofilter de verwijdering van methaan uit ventilatielucht van een drijfmestopslag getest. Het biofilter heeft een volume van 162 liter, is gevuld met een compost/perliet mengsel en wordt met actief slib geënt. Aangetoond wordt dat methaan succesvol verwijderd kan worden met biofiltratie. Na een opstartperiode van ongeveer 2 weken wordt een verwijdering tot 85% gerealiseerd. Het biofilter dat hiervoor nodig is, is eenvoudig van uitvoering en behoeft nauwelijks processturing. Tijdens het onderzoek varieert de methaanconcentratie van de te behandelen lucht tussen 500 en 5.500 mg/m^3 en varieert de luchtbelasting van het filter tussen 0,75 en 8,5 m^3/m^3 filtermateriaal/uur. De methaanverwijdering van het biofilter (g/m^3 filtermateriaal/uur) blijkt recht evenredig te zijn met de methaanconcentratie (g/m^3) van de ingaande lucht. Dit wordt veroorzaakt door de lage wateroplosbaarheid van methaan. In reguliere biofilters, waarbij redelijk tot goed oplosbare stoffen worden afgebroken, wordt dit verband niet gevonden maar hangt de verwijdering (g/m^3 filtermateriaal/uur) meestal af van de belasting (g/m^3 filtermateriaal/uur) van de te verwijderen component oftewel het product van concentratie en luchtdebiet. Uitgaand van een bepaalde gewenste methaanverwijdering (%) betekent het gevonden verband: hoe hoger de methaanconcentratie van de ingaande lucht, hoe kleiner het benodigde biofilter. De methaanconcentratie van de ventilatielucht van de mestopslag kan in principe ingesteld worden door het afregelen van het ventilatiedebiet en het openen of sluiten van aanwezige ventilatieopeningen in de afdekking van de mestopslag.

Een rekenvoorbeeld leert dat voor een mestopslag van 1000 m^3 en een methaanverwijdering van 50%, een biofilter nodig is met een volume van 20 - 80 m^3 (mits de methaanconcentratie voldoende hoog ingesteld wordt). Het benodigde grondoppervlak bedraagt ongeveer 1/3 m^2 per m^3 biofiltervolume.

Behalve methaan worden ook andere verbindingen uit de lucht verwijderd. De verwijdering van ammoniak (NH_3) uit de ventilatielucht bedraagt 90 - 100%. De verwijdering van waterstofsulfide (H_2S) uit de ventilatielucht bedraagt 100%. Het geurkarakter van de ventilatielucht verandert door het biofilter van 'mestlucht' in 'bosgeur'.

De behandeling van stallucht in een biofilter wordt niet haalbaar geacht aangezien de methaanconcentratie van stallucht vele malen lager is dan de lucht uit een mestopslag. Alleen wanneer een biofilter wordt ontwikkeld met een hoge oplosbaarheid van methaan, kan stallucht worden behandeld in een biofilter van beperkte omvang.

SUMMARY

Methane (CH₄) is a very potent greenhouse gas (21 times stronger than CO₂). Livestock farming is responsible for a considerable high emission of methane. The aim of this research is to develop a biological air treatment system that is capable of removing methane from exhaust air from liquid manure storages and from animal houses.

The removal of methane from exhaust air from a liquid manure storage tank is tested during a period of 2 months using a biofilter. The volume of the biofilter is 162 litres and as filter medium a mixture of compost and perlite is used. The filter medium is inoculated with active sludge.

The experiments show that methane can be removed successfully with biofiltration. After a start-up period of about 2 weeks a methane removal up to 85% is achieved. The biofilter that is used has a simple design and hardly needs any process control. During the experiments the methane concentration of the treated air ranges from 500 to 5,500 mg/m³; the air flow ranges from 0.75 en 8.5 m³/m³ medium/hour.

The methane removal (g/m³ filter medium/hour) appears to be directly proportional to the methane concentration (g/m³) of the inlet air of the biofilter. This is the result of the poor water solubility of methane. In regular biofilters, that treat moderate to very well soluble components, component removal (g/m³ filter medium/hour) depends on the load of the component (g/m³ filter medium/hour), not on the concentration of the component. Assuming a desired methane removal (%), the size of the required biofilter is inversely proportional to the inlet methane concentration. The methane concentration of the exhaust air from the manure storage tank can be set by adjusting the air flow and by closing or opening exhaust holes in the cover of the manure storage tank.

An example calculation shows that a biofilter of 20 - 80 m³ is required to achieve a methane removal of 50% from exhaust air of a 1,000 m³ manure storage tank (assuming methane concentration of exhaust can be adjusted). The required surface area is about 1/3 m² per m³ of biofilter volume.

Besides methane also other compounds are removed from the exhaust air. The removal of ammonia (NH₃) is 90 - 100% and the removal of hydrogensulphide (H₂S) is 100%. The odour characteristics of the air change from the smell of 'manure' to the smell of 'forest soil'.

Treatment of exhaust air from pig or cow barns is considered unfeasible as a results of the very low methane concentration in this air. Only if the solubility of methane can be increased this air can be treated in a biofilter of confined size.

1 INLEIDING

1.1 Probleemstelling

De Nederlandse veestapel is verantwoordelijk voor een betrekkelijk hoge emissie van overige broeikasgassen¹. De broeikasgasemissie bestaat voornamelijk uit methaan (CH₄) en bedraagt ca. 10 Mton CO₂-eq. per jaar. Tachtig procent van deze emissie (8 Mton CO₂-eq.) is afkomstig van pensvergisting in herkauwers (hoofdzakelijk koeien) en twintig procent (2 Mton CO₂-eq.) is afkomstig van vergistingsprocessen die plaatsvinden gedurende mestopslag, zowel onder de stal als in opslagen buiten de stal (RIVM & CBS, 2001).

Reiniging van ventilatielucht van stallen (d.w.z. emissies uit de mestopslag onder de stal en rechtstreekse emissies uit het dier) en van ventilatielucht van externe mestopslagen heeft daarom een hoog potentieel voor reductie van emissie van overige broeikasgassen. Op dit moment is er echter geen 'methaanfilter' commercieel beschikbaar.

1.2 Doelstelling

Het doel van het project is het ontwikkelen van een biologisch luchtfilter dat gebruikt kan worden voor verwijdering van methaan uit lucht afkomstig van stallen en/of mestopslagen. Er wordt gestreefd naar het bereiken van een reductie van de emissie van broeikasgassen van ten minste 50%.

1.3 Financiering en projectstructuur

De uitvoering van dit project is mogelijk gemaakt door financiering van Novem in het kader van het Besluit milieusubsidies Subsidieregeling Reductie Overige Broeikasgassen (ROB-AGRO projectnummer: 375102/0010) en van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij (Vrije ruimte programma 309, 'Gasvormige emissies in de veehouderij').

Het project is uitgevoerd door een consortium van IMAG (subsidieaanvrager), Stork-SPE (projectpartner) en Bioclear (derde). IMAG is penvoerder van het project en belast met de projectcoördinatie en rapportage. Het project bestaat uit vier verschillende fasen:

** Fase 1: Literatuurstudie*

In deze fase wordt de informatie die uit de literatuur bekend is met betrekking tot de biologische afbraak van methaan en de daarvoor geschikte behandelingstechnieken in kaart gebracht. De behandelingstechnieken worden geëvalueerd om te bepalen welke techniek het meest geschikt is voor de behandeling van methaan uit lucht van stallen en/of mestopslagen. Fase 1 is uitgevoerd door Bioclear in opdracht van IMAG. De resultaten van Fase 1 zijn gepubliceerd in Bommel & Werf (2002).

¹ Met 'overige broeikasgassen' worden alle broeikasgassen behalve CO₂ bedoeld.

** Fase 2: Microbiologisch laboratoriumonderzoek*

In Fase 2 worden verschillende bacteriestammen onderzocht die methaan afbreken tot CO₂ (groeisnelheid, afbraaksnelheid methaan, gevoeligheid voor omgevingsomstandigheden etc.) zodat een geschikte stam kan geselecteerd worden voor toepassing in een biologisch filter. Fase 2 is uitgevoerd door Bioclear in opdracht van IMAG. De resultaten van Fase 2 zijn gepubliceerd in Werf (2002).

** Fase 3: Bouw van en onderzoek aan pilot-scale filterinstallatie*

In Fase 3 wordt op grond van de resultaten uit Fase 1 en Fase 2 een pilot-scale filterinstallatie ontworpen en gebouwd. Het onderzoek dat aan de filterinstallatie uitgevoerd wordt, is gericht op het op kleine schaal testen van het luchtbehandelingssysteem en vast te stellen wat de maximale belasting van het biofilter is. Fase 3 is uitgevoerd door IMAG; de resultaten van Fase 3 worden in onderliggend rapport beschreven.

** Fase 4: Deskstudie naar technische en economische haalbaarheid*

Op grond van de voorafgaande projectfasen wordt tenslotte in een bureaustudie de technische en economische haalbaarheid van een full-scale luchtfilterinstallatie beschreven. Deze studie is uitgevoerd door Stork-SPE (projectpartner) en is gepubliceerd in Brunink (2002).

2 EIGENSCHAPPEN VENTILATIELUCHT

2.1 Inleiding

In onderliggend onderzoek wordt getracht een biologisch luchtfilter te ontwerpen dat geschikt is voor de behandeling van ventilatielucht afkomstig van stallen en/of mestopslagen. De eigenschappen van deze ventilatielucht worden hieronder beschreven.

2.2 Ventilatielucht van stallen

In het verleden zijn veel metingen uitgevoerd aan de ventilatielucht van stallen en de lucht in stallen. De concentratie van de aanwezige verbindingen hangt af van diersoort, huisvestingssysteem, ventilatiedebiet en andere management aspecten. Voor varkens- en koeienstallen geldt dat er vaak een mestkelder met drijfmest aanwezig is onder de stal die in open verbinding staat met de stal zelf. De lucht in de stal is een mengsel van buitenlucht die door het ventilatiesysteem wordt aangevoerd en gasvormige verbindingen die emitteren uit de mestkelder en de dieren (pensvergisting). In Tabel 1 wordt een overzicht gegeven van de eigenschappen van ventilatielucht uit koeien- en varkensstallen.

Tabel 1 Eigenschappen van ventilatielucht uit stallen (koeien en varkens)¹

Component, eigenschap	Eenheid	Waarde
CH ₄	ppm	10 - 160
NH ₃	ppm	5 - 50; Nederland: 2 - 20
H ₂ S	ppm	0 - 100
CO ₂	ppm	400 - 4,000
N ₂ O	ppm	0.3 - 3
Geur	Odour Unit/m ³ (OU _E /m ³)	1,000 - 5,000
Temperatuur	°C	15 - 25
Relatieve vochtigheid	%	50 - 80

¹ Bron: Anderson *et al.*, 1987; Schulte, 1997; Guingand *et al.*, 1997; Groot Koerkamp, 1997; referenties uit Meyer & Manbeck, 1986; Ogink & Lens, 2000.

Varkenstallen zijn gewoonlijk gesloten ruimten die mechanisch geventileerd worden. het ventilatiedebiet varieert van 20 - 240 m³/zeug/uur (gemiddeld: 100 m³/zeug/uur) tot 10 - 90 m³/vleesvarken/uur (gemiddeld: 35 m³/vleesvarken/uur) (Mol, 2003).

Melkveestallen zijn meestal gedeeltelijk open gebouwen met een 'natuurlijk' ventilatiesysteem: buitenlucht stroomt onder invloed van windsnelheid en -richting door het gebouw. Het ventilatiedebiet bedraagt, afhankelijk van de wind, 750 - 3.000 m³/koe/uur. Als minimumventilatie die nodig is om voldoende warmte uit de stal af te voeren wordt een ventilatiedebiet van 750 m³/koe/uur gehanteerd (Asijee, 1993).

2.3 Ventilatielucht van buitengelegen mestopslagen

Wanneer niet voldoende mestopslagcapaciteit beschikbaar is onder de stal, wordt de drijfmest gewoonlijk opgeslagen in een tank of silo die op het bedrijf is gelegen. In Nederland moeten mestopslagen afgedekt zijn en is op een veehouderijbedrijf gewoonlijk mestopslagcapaciteit aanwezig voor een periode van ongeveer 6 maanden, aangezien er geen mest op het land aangewend mag worden in de periode van augustus tot februari. De omvang van dergelijke mestopslagen varieert gewoonlijk van 500 tot 1.500 m³. Wanneer de opslag 6 maanden per jaar gebruikt wordt, is een opslag van 1000 m³ genoeg voor de mestproductie van ongeveer 1700 vleesvarkensplaatsen. Tabel 2 vermeldt een aantal metingen aan de headspace van een aantal afgedekte drijfmestopslagtanks.

Tabel 2 Eigenschappen van lucht in headspace van afgedekte drijfmestopslagtank (koeien- en varkensdrijfmest)¹

Component, eigenschap	Eenheid	Waarde
CH ₄	ppm	200 - 33,000 ²
NH ₃	ppm	1 - 71
H ₂ S	ppm	0 - 4,100
CO ₂	ppm	400 - 4,000
N ₂ O	ppm	100 - 150,000
N ₂	vol%	60 - 81
O ₂	vol%	15 - 22
Temperatuur	°C	10 - 16 ³
Relatieve vochtigheid	%	100

¹ Bron: Uenk *et al.*, 1993; Williams & Nigro, 1997.

² Wanneer ventilatie nul is, kan methaangehalte oplopen tot biogas: 65 vol% of 650.000 ppm.

³ Gelijk aan gemiddelde buitentemperatuur.

In een aantal studies worden behalve de methaanconcentratie ook de emissies van methaan uit drijfmestopslagen gemeten. Een aantal van deze metingen wordt in Tabel 3 gegeven. Behalve door de temperatuur, wordt de emissie van CH₄ uit een mestopslag sterk beïnvloed door het organische stof gehalte en de leeftijd ('versheid') van de mest.

Tabel 3 Methaanemissie uit drijfmestopslag tanks bij verschillende temperatuur (koeien- en varkensmest)

Bron	Temperatuur	CH4 emissie (g/m ³ /dag)	
		Varkens	Koeien
Williams & Nigro, 1997:	4°C	6	18
	11°C	4	36
	18°C	46	61
Hansen, s.a.:	4°C	6	2.4
	10°C	16	6
	15°C	40	12
Husted, 1994:	buitentemperatuur (jaarrond)	0.4 - 35.8	0.0 - 34.5

3 VOORAFGAAND ONDERZOEK

3.1 Inleiding

De opzet van het onderzoek aan de pilot-scale filterinstallatie is gebaseerd op de resultaten van Fase 1 en Fase 2 (zie hoofdstuk 1.3 voor de projectstructuur). Hieronder worden de belangrijkste resultaten van Fase 1 en Fase 2 besproken en aangegeven wordt wat dit betekent voor het ontwerp van de pilot-scale luchtfilterinstallatie.

3.2 Principe van biologische luchtreiniging

3.2.1 *Bacteriën*

In een biologisch luchtfilter wordt lucht, waarin zich ongewenste verbindingen bevinden, door een poreus drager- of filtermateriaal geleid waarop zich bacteriën bevinden.

In de eerste plaats moeten er dus bacteriën aanwezig zijn die in staat zijn om de ongewenste verbinding(en) te kunnen omzetten. Veel verbindingen kunnen microbiologisch omgezet worden en in het algemeen is het geen probleem om de juiste bacteriën te verkrijgen: wanneer het dragermateriaal in het luchtfilter wordt geënt met een mengsel van verschillende soorten bacteriën (bijv. actief slib uit een aërobe rioolwaterzuiveringsinstallatie) en vervolgens wordt blootgesteld aan de te verwijderen componenten (= substraat) blijven op den duur juist die bacteriën over die de aangeboden component kunnen omzetten. De bacteriën die onder aërobe omstandigheden methaan kunnen oxideren worden methanotrofen genoemd.

De condities in het systeem (voedingsstoffen, spore-elementen, pH, temperatuur etc.) moeten dusdanig zijn dat de bacterie goed kan functioneren.

3.2.2 *Massatransport*

In de tweede plaats moet de af te breken verbinding van de gasfase naar de waterfase worden getransporteerd. De bacteriën leven in een waterig milieu en kunnen de af te breken verbinding alleen omzetten wanneer deze in de waterfase terechtkomt.

De belangrijkste factoren waardoor de snelheid van dit massatransport wordt bepaald, worden hieronder toegelicht.

a) Contactoppervlak gasfase-waterfase.

De snelheid van het massatransport is recht evenredig met de grootte van het contactoppervlak gasfase-waterfase. De grootte van dit oppervlak wordt bepaald door het volume (m^3) en specifiek oppervlak van het dragermateriaal waarop de bacteriën zich bevinden (m^2 oppervlak/ m^3 reactor), in combinatie met de manier waarop gas en water met elkaar in contact worden gebracht

(druppelen, versproeien etc.). Compost heeft een relatief hoog specifiek oppervlak (ca. 1.500 m²/m³).

b) Oplosbaarheid van verbinding

De wateroplosbaarheid van een verbinding is van groot belang voor de overdracht van de verbinding van de gasfase naar de waterfase. In een evenwichtssituatie is de concentratie van de component in de waterfase recht evenredig met de concentratie van de component in de gasfase volgens de wet van Henry. Wanneer de concentratie van de verbinding in de lucht hoger wordt, zal de concentratie van de verbinding in de waterfase dus evenredig hoger worden. Hierdoor wordt de hoeveelheid substraat die voor de bacteriën beschikbaar is en afgebroken kan worden eveneens hoger aangezien de bacteriën hun substraat opnemen uit de waterfase. De hoeveelheid van de verbinding die door de bacteriën verwijderd wordt zal dus toenemen.

De Henry constante van methaan ($C_{\text{water}}/C_{\text{lucht}}$) is relatief laag en bedraagt circa $1,5 \times 10^{-3}$ (mol/l)/atm (Sander, 1999) oftewel $3,7 \times 10^{-2}$ (kg/m³)/(kg/m³); methaan wordt daarom beschouwd als een slecht wateroplosbare stof. Bij een methaanconcentratie in de gasfase van bijvoorbeeld 5.000 mg/m³ bedraagt de methaanconcentratie die hiermee in evenwicht is in de waterfase dus 0,19 mg/l. In plaats van Henry constante wordt ook wel de verdelingscoëfficiënt m_w gehanteerd die gelijk is de reciproque waarde van de Henry constante.

Wanneer in een biofilter een goed oplosbare stof (hoge Henry constante) wordt verwijderd uit de luchtstroom, hangt de afbraak enerzijds af van de hoeveelheid substraat die wordt aangeboden (vracht) en anderzijds van de afbraakcapaciteit van de aanwezige biomassa. De verwijdering van de component zal dan niet beperkt worden door de oplosbaarheid van component.

c) Contacttijd gasfase-waterfase

Om massatransport te laten plaatsvinden moet er gedurende enige tijd contact zijn tussen de gasfase en de waterfase. In de praktijk wordt deze contacttijd gekwantificeerd als superficiële luchtverblijftijd (volume reactor (m³) : luchtdebiet (m³/uur)) of als luchtbelasting (m³ lucht/m³ reactor/uur). In de praktijk betekent een lange luchtverblijftijd meestal dat de verhouding gasdebiet / waterdebiet klein is en dat de vracht van de af te breken component laag is. Om een hoog verwijderingsrendement te verkrijgen wordt daarom voor slecht oplosbare verbindingen meestal een lange luchtverblijftijd gehanteerd.

3.3 Fase 1: Literatuurstudie

Uit de literatuur zijn geen onderzoeken bekend waarbij het doel is methaan te verwijderen uit ventilatielucht van stallen of mestopslagen. In een aantal biofilters die ontworpen zijn voor de verwijdering van ammoniak of geur uit stallucht is wel gemeten aan methaanverwijdering. De

methaanverwijdering blijkt in die gevallen zeer laag te zijn als gevolg van de lage oplosbaarheid van methaan.

Er is wel een aantal toepassingen bekend waarbij methaanhoudend afgas van een vuilstortplaats wordt behandeld in een biofilter. In vergelijking met ventilatielucht van stallen is de methaanconcentratie in stortgas echter vele malen hoger.

Als gevolg van de relatief lage concentratie van methaan in stallucht (zie Tabel 1) wordt geconcludeerd dat praktische toepassing van een biologische filterinstallatie voor deze luchtstroom niet mogelijk is. De omvang van een dergelijke filterinstallatie zou namelijk enige tienduizenden m³ bedragen. Behandeling van ventilatielucht uit mestopslagen biedt wel praktische perspectieven aangezien de omvang van een dergelijk filter vele malen lager zal zijn als gevolg van de veel hogere methaanconcentratie.

Verschillende biologische technieken en dragermaterialen worden geëvalueerd. Geconcludeerd wordt dat een biofilter (dragermateriaal: mengsel compost/perliet) of een biotricklingfilter (dragermateriaal: plastic pakkingsringen of polyurethaan) het meest geschikt is voor de behandeling van lucht uit een mestopslag.

Er worden geen problemen verwacht met betrekking tot verzuring van een biofilter of biotricklingfilter als gevolg van oxidatie van NH₃ en H₂S aangezien de vracht van deze componenten 100 zo laag is als de vracht die nog juist acceptabel wordt geacht voor een biofilter of biotricklingfilter.

In Bommel & Werf (2002) worden de resultaten van het onderzoek uitgebreid beschreven.

3.4 Fase 2: Microbiologisch laboratoriumonderzoek

In het microbiologisch onderzoek worden vier bacterieculturen beschouwd: twee reïnculturen en twee mengculturen. De mengculturen zijn afkomstig van een rioolwaterzuiveringsinstallatie (actief slib monster) en een compostfilter dat stortgas behandelt. In een biofilter met een inert dragermateriaal is beënting met een bacteriestam noodzakelijk. In een biofilter met compost als dragermateriaal is beënting met name zinvol om onmiddellijk na opstart het rendement te verhogen; op lange termijn is het effect van beënting in het algemeen niet meetbaar.

Uit het onderzoek blijkt dat er geen duidelijk verschil is tussen de groeisnelheid van de geteste reïnculturen en de mengculturen. Ook met betrekking tot de invloed van temperatuur, pH en ammoniumconcentratie op de groeisnelheid zijn er geen grote verschillen tussen de bacteriestammen.

Aangezien er geen duidelijke voordelen zijn aangetoond van het gebruik van (dure) reïnculturen wordt aanbevolen gebruik te maken van actief slib als bacterieel entmateriaal van een biologisch luchtfilter.

In Werf (2002) worden de resultaten van het onderzoek uitgebreid beschreven.

3.5 Ontwerp pilot-scale biofilter

Op grond van de literatuurstudie en het microbiologisch onderzoek worden de volgende uitgangspunten gehanteerd voor het onderzoek aan een pilot-scale luchtfilterinstallatie:

- Luchtstroom

Vanwege de lage methaanconcentraties in stallucht wordt verwacht dat de omvang van een biofilter voor deze toepassing extreem groot zal worden. Daarom wordt besloten het pilot-onderzoek te richten op ventilatielucht van een mestopslag. Er wordt gekozen voor een mestopslag gevuld met varkensdrijfmest.

Wanneer de beschikbaarheid van methaan voor de bacteriën verhoogd zou kunnen worden, zou de behandeling van ventilatielucht, ondanks de lage methaanconcentratie, wel tot de mogelijkheden behoren. Hierdoor zou de potentie voor emissiereductie van overige broeikasgassen door het biofilter aanzienlijk toenemen. Zie in dit verband de eerste aanbeveling voor nader onderzoek ("Verhoging beschikbaarheid methaan") in hoofdstuk 7 van dit rapport.

- Behandelingstechniek

Gezien de zuurstofconcentratie in ventilatielucht van een mestopslag (> 15 vol%) zal de behandeling van de lucht plaatsvinden onder aërobe omstandigheden. Er wordt gekozen voor het bouwen van een biofilter gevuld met een compost/perliet mengsel (60/40 op volumebasis). De mogelijkheid van een biotricklingfilter wordt niet onderzocht vanwege de verwachting dat een biotricklingfilter veel groter zal uitvallen dan een biofilter als gevolg van het lagere specifiek oppervlak per m³ reactorvolume. Bovendien zijn twee voordelen van een biotricklingfilter boven een biofilter, lage drukval en goed te controleren procesomstandigheden, niet van toepassing in deze situatie. De drukval die bij het biofilter verwacht wordt is namelijk zeer laag vanwege de lage luchtbelasting. Vanwege de lage luchtbelasting is evenmin verzuring of ophoping van afbraakproducten te verwachten zodat een beperktere controle van de procesomstandigheden geen probleem is.

- Ent

Om de opstartperiode (de tijd die nodig is om een stabiel verwijderingsrendementen te verkrijgen) te verlagen wordt ervoor gekozen het pilot-scale biofilter te beënten met actief slib.

- Dimensionering

Op grond van de literatuur wordt ingeschat dat voor de reiniging (50% methaanverwijdering) van ventilatielucht van een mestopslag van 1000 m³, een biofilter nodig zal zijn van 100 - 150 m³. De luchtbelasting wordt ingeschat op 0,5 - 1,5 m³ lucht/m³ reactorvolume/uur. De pilot-scale experimenten worden daarom gestart met een luchtbelasting van 0,75 m³ lucht/m³ reactorvolume/uur.

4 MATERIAAL EN METHODEN

4.1 Onderzoeksopzet

Gedurende een periode van twee maanden (26 september 2002 - 21 november 2002) wordt biofiltratie van ventilatielucht van een mestopslag getest op pilot-scale onder aërobe omstandigheden. Alhoewel biogas geen zuurstof bevat, bevat de ventilatielucht van de mestopslag gedurende het experiment circa 15 vol% als gevolg van luchtuitwisseling tussen de headspace van de mestopslag en de omgeving.

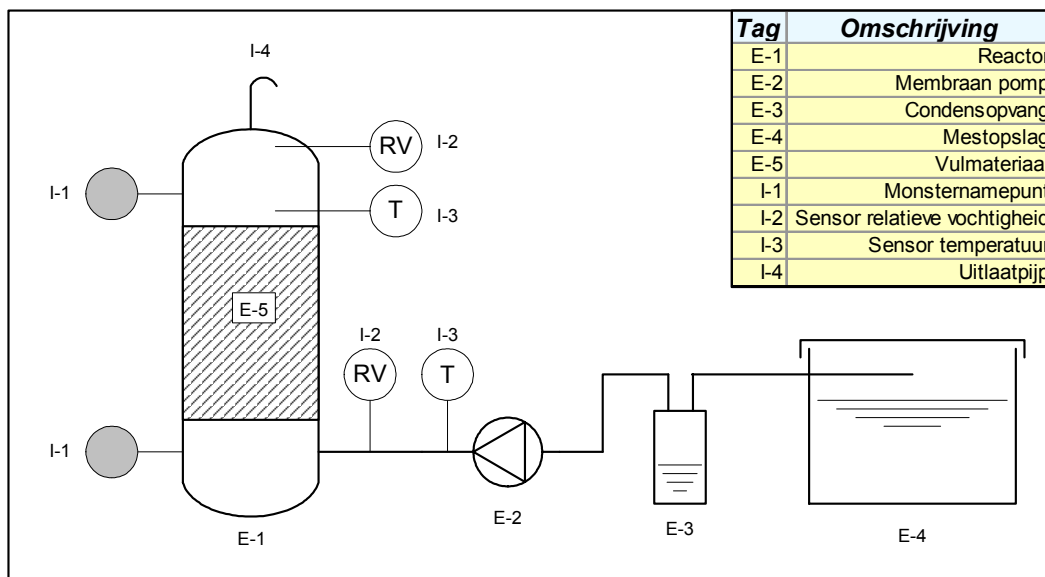
Het doel van de experimenten is vast te stellen onder welke omstandigheden succesvolle verwijdering van methaan mogelijk is en wat de maximale belasting van het biofilter is. Om dit vast te stellen wordt het luchtdebiet gedurende het experiment stapsgewijs verhoogd.

4.2 Beschrijving biofilter

Het biofilter bestaat uit een cilindervormige reactor van 180 liter (hoogte: 95 cm; diameter: 49 cm; materiaal: plexiglas) die geplaatst is op een luchtverdeelkamer (hoogte: 30 cm; materiaal: PVC). De reactor kan doorstroomd worden met de te behandelen lucht en is gevuld met dragermateriaal waarop zich een bacteriepopulatie kan ontwikkelen. Tussen de reactor en de luchtverdeelkamer bevindt zich een geperforeerde plaat die lucht kan doorlaten en het dragermateriaal, dat op de plaat rust, tegenhoudt. Aan de onderzijde van de luchtverdeelkamer kan eventueel percolaat worden afgevoerd. Het filtermateriaal wordt niet bevochtigd. Figuur 1 is een foto van het biofilter. Het biofilter is opgesteld in een afgesloten container. Naast deze container bevindt zich een ronde mestopslagtank van 5,7 m³ (materiaal: staal; hoogte: 2,0 m; diameter: 1,9 m) die voor circa 80% is gevuld met vleesvarkensmest. De bovenzijde van de tank is afgedekt met een kunststof deksel. Met behulp van twee membraanpompen (KNF Laboport N820 AT.181, 20 l/min; KNF N1200 ANE, 150 l/min) wordt lucht van boven het mestoppervlak van de tank afgezogen en via een condensfles naar het biofilter geleid. Het luchtdebiet wordt ingesteld en 2 à 3 maal per week afgelezen met behulp van twee rotameters (Platon, 0,6 - 5 l/min; Platon, 2 - 25 l/min) met ingebouwd naaldventiel. Het biofilter wordt van onder naar boven doorstroomd. In zowel de ingaande als uitgaande luchtstroom van het biofilter is een gecombineerde temperatuur/relatieve vochtigheidssensor (Rotronic Hygromer Serie 1200) geplaatst waarmee elke 5 minuten de temperatuur en relatieve vochtigheid wordt geregistreerd. De ingaande en uitgaande luchtstroom van het biofilter kan worden bemonsterd. In Figuur 2 wordt een schematische weergave van het biofiltratiesysteem gegeven.



Figuur 1 Pilot-scale biofilter gevuld met compost/perliet mengsel voor methaanverwijdering uit ventilatielucht van drijfmestopslag.



Figuur 2 Schematische weergave van pilot-scale biofilter gevuld met compost/perliet mengsel voor methaanverwijdering uit ventilatielucht van drijfmestopslag.

4.3 Metingen en analyses

Luchtanalyses

De ingaande en uitgaande luchtstroom van het biofilter wordt 2 à 3 maal per week bemonsterd en op de volgende verbindingen geanalyseerd:

- Methaan (CH₄)
- Koolstofdioxide (CO₂)
- Lachgas (N₂O)
- Ammoniak (NH₃)
- Waterstofsulfide (H₂S)

De concentraties van methaan, koolstofdioxide en lachgas worden gemeten met behulp van een gaschromatograaf (Interscience/Carbo Erba Instruments, GC 8000 Top; kolom: Molsieve 5A (CH₄, CO₂), Haysep Q (N₂O, SF₆); detector: CH₄: FID/HWD, N₂O: ECD/HWD, CO₂: HWD; SF₆: ECD). De concentraties van ammoniak en waterstofsulfide worden indicatief bepaald met behulp van gasdetectiebuisjes (Kitagawa, 105SD, 120SB).

Filtermateriaal

Het filtermateriaal wordt bemonsterd en geanalyseerd een week nadat het biofilter is opgestart en nogmaals nadat het experiment is afgelopen. De volgende analyses worden uitgevoerd: gehalte van droge stof, asrest, gehalte van N-totaal, N-NH₄, N-NO₂, N-NO₃, P-totaal en K-totaal,

geleidbaarheid (EC) en pH. De analyses worden uitgevoerd door het Milieulaboratorium van IMAG, Wageningen conform voorgeschreven analysemethoden.

Er wordt een bacterietelling uitgevoerd van methanotrofen middels de MPN-methode (Most Probable Number). Deze meting wordt uitgevoerd door Bioclear, Groningen.

Drukval

De drukval over het biofilter wordt eens per week gemeten met een verschilddrukmeter (Special Instruments, Digima Premo B-026).

4.4 Samenstelling filtermateriaal

De reactor wordt voor 90% (162 liter) gevuld met een mengsel van compost (Naturado Veenendaal siertuincompost) en geëxpandeerd perliet (Pull Rhenen Agra-Perlite; deeltjesgrootte: 0,6 - 7,5 mm) in een volumeverhouding van 60 : 40. Perliet is een vulkanisch gesteente dat hoofdzakelijk uit SiO₂ en Al₂O₃ bestaat en door verhitting wordt geëxpandeerd tot ongeveer 20 maal het oorspronkelijke volume. Hierdoor worden ruwe, poreuze korrels gevormd met een zeer lag bulkdichtheid. Perliet wordt o.a. gebruikt als toeslagstof voor pot- of zaaigrond om de porositeit van de grond te verhogen. In Tabel 4 wordt de gemiddelde samenstelling van perliet gegeven.

Tabel 4 Samenstelling perliet (Abalos *et al.*, 2003)

Omschrijving	Waarde
Bulkdichtheid (kg/m ³)	95
SiO ₂ (mol%)	75,36
TiO ₂ (mol%)	0,20
Al ₂ O ₃ (mol%)	13,85
Fe ₂ O ₃ (mol%)	0,67
FeO (mol%)	0,00
MnO (mol%)	0,08
MgO (mol%)	0,29
CaO (mol%)	1,07
Na ₂ O (mol%)	3,58
K ₂ O (mol%)	4,84
P ₂ O ₅ (mol%)	0,04

In Tabel 5 wordt de samenstelling van de gebruikte compost gegeven. De analyses zijn uitgevoerd door het Milieulaboratorium van IMAG conform gecertificeerde analysemethoden.

Tabel 5 Samenstelling Naturado Veenendaal siertuincompost

Omschrijving	Waarde
Bulkdichtheid (kg/m ³)	415
Droge stof (g/kg)	348
As (g/kg)	115
N-totaal (g/kg)	3,14
N-NH ₄ (g/kg)	0,01
N-NO ₃ (g/kg)	0,41
P-totaal (g/kg)	0,301
K-totaal (g/kg)	1,24
EC (mS/cm)	4,6 (*)
pH	4,8 (*)

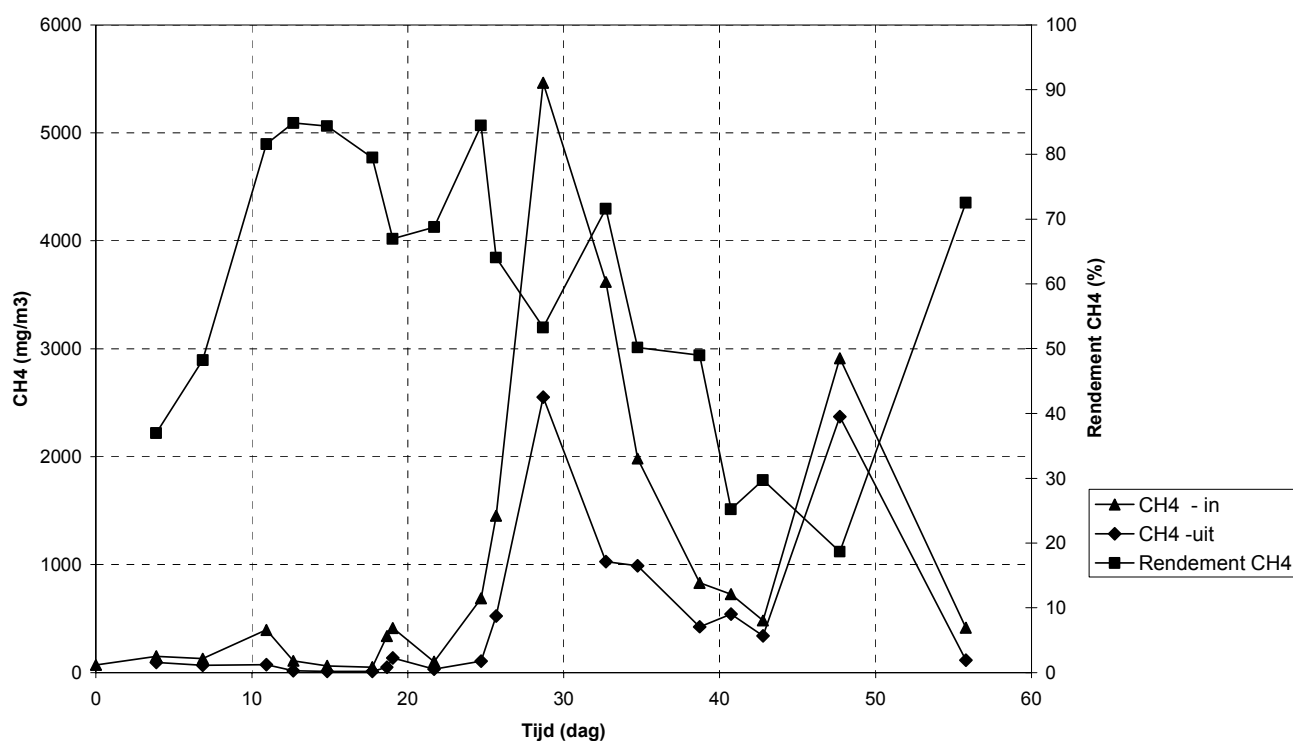
(*) Voor het uitvoeren van de bepaling is het monster met 4 delen water (op gewichtsbasis) verdund.

Voor een goed functionerend biofilter dient de pH zich tussen 6,5 en 7,5 te bevinden. Normaliter bevindt de pH van compost zich binnen dit bereik maar de compost uit Tabel 5 heeft een lagere pH. Om de pH van de compost uit Tabel 4 tot 7 te verhogen, wordt per kg compost 100 g kalkmeststof toegevoegd (ECOstyle Maërl Koraalalgen-kalk, 45 massa% CaO, 5 massa% MgO) waardoor een pH wordt bereikt van ongeveer 7. Het stikstofgehalte uit Tabel 5 is voldoende voor een goed functionerend biofilter, het fosfaatgehalte is aan de lage kant. Om het fosfaatgehalte van de compost te verhogen wordt per kg compost eveneens 1,5 g fosformeststof toegevoegd (ECOstyle beendermeel, 15 massa% P-org en 5 massa% N-org). De dichtheid van het mengsel van compost, perliet, kalk- en fosformeststof bedraagt circa 320 kg/m³.

5 RESULTATEN EN DISCUSSIE

5.1 Methaanverwijdering en luchtbelasting

Het biofilter wordt opgestart op 26 september 2002 (dag 0) en geënt met circa 50 liter actief slib afkomstig uit de nabezinktank van de RWZI Ede). Als gevolg hiervan wordt gedurende de eerste week circa 15 liter percolaat gevormd dat afgevoerd wordt. De luchtbelasting wordt gedurende de eerste twee weken ingesteld op $0,75 \text{ m}^3/\text{m}^3$ filtermateriaal/uur (zie Figuur 4). In Figuur 3 wordt de methaanconcentratie van de ingaande en uitgaande lucht van het biofilter en het hieruit berekende verwijderingsrendement weergegeven gedurende de meetperiode.



Figuur 3 Methaanverwijdering door biofilter voor behandeling van ventilatielucht van drijfmestopslag (CH_4 : $1 \text{ mg}/\text{m}^3 = 1,5 \text{ ppm}$).

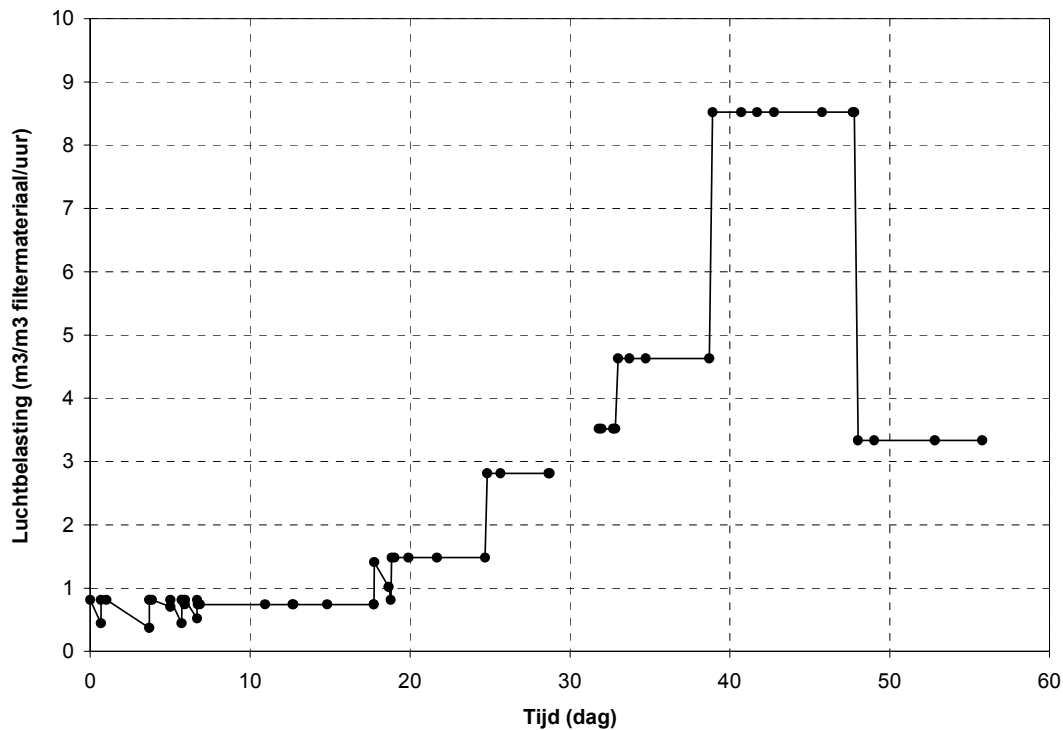
De methaanconcentratie van de ingaande lucht wordt bepaald door de methaanproductie in de mestopslagtank en de mate waarin luchtuitwisseling optreedt tussen de headspace van de tank en de buitenlucht. De methaanproductie wordt bepaald door de temperatuur van de mest, de hoeveelheid biologisch afbreekbaar materiaal en de hoeveelheid methanotrofe bacteriën in de mest. De luchtuitwisseling (oftewel de verdunning met buitenlucht) wordt bepaald door de kwaliteit van de afdekking en door de hoeveelheid lucht die van onder het deksel van de

mestopslag wordt afgezogen en naar het biofilter wordt geleid. Doordat de headspace van de mestopslag drukloos is vanwege lekkages in de afdekking, wordt alle afgezogen lucht vervangen door buitenlucht. De methaanconcentratie van (onverdund) biogas bedraagt ongeveer 65 vol% (425 g/m^3) zodat uit Figuur 3 geconcludeerd kan worden dat er sprake is van een aanzienlijke verdunning met buitenlucht.

In de eerste 2 weken stijgt het methaanverwijderingsrendement sterk. Deze stijging is een normaal verloop bij het opstarten van een biofilter: aanvankelijk is er slechts een beperkte hoeveelheid methanotrofe bacteriën aanwezig in het biofilter die afkomstig is uit de compost en het actief slib. Wanneer er echter methaanhoudende lucht wordt aangeboden aan het filter zullen de bacteriën die methaan als substraat kunnen gebruiken (methanotrofen) sterk in aantal gaan toenemen. Als gevolg van de toename van de hoeveelheid methanotrofe bacteriën neemt het methaanverwijderingsrendement sterk toe. Na twee weken stabiliseert het methaanverwijderingsrendement zich op 80 - 85%. Dit wijst erop dat er een evenwicht is bereikt tussen de hoeveelheid substraat die in de waterfase beschikbaar is voor de methanotrofe bacteriën (opgelost CH_4) en de hoeveelheid methanotrofe bacteriën die aanwezig is.

Op dag 18 wordt gestart met het stapsgewijs verhogen van de luchtbelasting (Figuur 4). Tussen het tijdstip waarop het luchtdebiet wordt aangepast en het tijdstip waarop een meting van de in- en uitgaande methaanconcentratie wordt gedaan, zit minimaal 24 uur. Als gevolg van de verhoging van de luchtbelasting neemt het verwijderingsrendement sterk af. De biomassa die in en op het filtermateriaal aanwezig is, is niet in staat om zoveel methaan af te breken dat het methaanverwijderingsrendement op peil blijft bij een verhoogde belasting. Een lager methaanverwijderingsrendement betekent echter niet dat de hoeveelheid methaan die verwijderd is (uitgedrukt als $\text{kg CH}_4/\text{m}^3$ filtermateriaal/uur) afneemt. De relatie tussen methaanconcentratie, luchtbelasting, methaanvracht en verwijderingsrendement wordt nader besproken in 5.8. Wanneer de luchtbelasting weer wordt verlaagd (dag 48) neemt het methaanverwijderingsrendement (Figuur 3) weer sterk toe.

De sterke stijging van de ingaande methaanconcentratie op dag 25 (Figuur 3) wordt veroorzaakt door het aanbrengen van een waterslot tussen de mestopslagtank en het deksel waardoor de verdunning met buitenlucht plotseling afneemt. De hierop volgende afname van de ingaande methaanconcentratie wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de verdere verhoging van de luchtbelasting (een verdriedubbeling ten opzicht van dag 25).



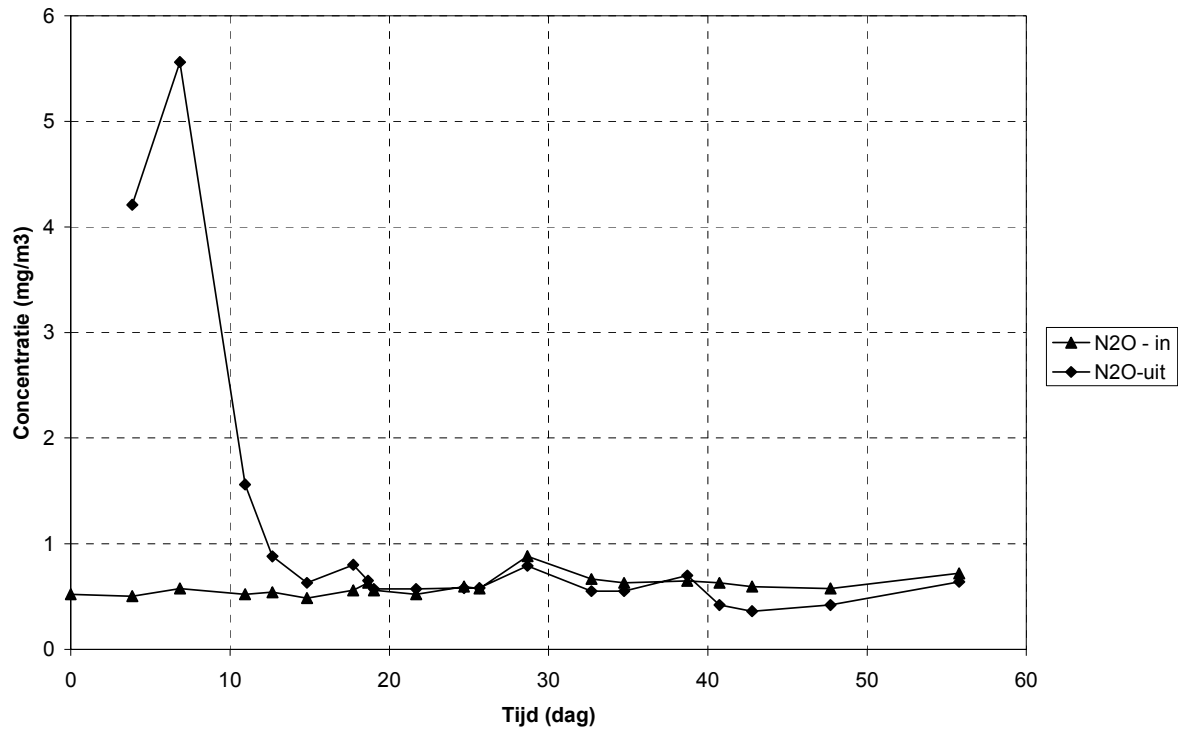
Figuur 4 Luchtbelasting van biofilter voor behandeling van ventilatielucht van drijfmestopslag.

5.2 Lachgas

Het verloop van de lachgasconcentratie is weergegeven in Figuur 7. De ingaande concentratie is gedurende het gehele experiment gelijk aan de atmosferische lachgasconcentratie. Gedurende de opstart van het biofilter (de eerste twee weken) ligt de uitgaande N_2O -concentratie ver boven de ingaande concentratie. Aangezien de luchtbelasting tijdens deze periode zeer laag is, is de N_2O -vracht desondanks laag. De verhoging van de lachgasconcentratie wordt waarschijnlijk veroorzaakt door één of een combinatie van de twee onderstaande processen:

- 1) Voorafgaand aan het experiment was de compost opgeslagen in een luchtdichte zak. Tijdens de opslag heeft zich mogelijk N_2O gevormd als gevolg van onvolledige nitrificatie en/of denitrificatie in de compost. Wanneer het experiment wordt gestart en er lucht door de compost wordt geblazen wordt het reeds gevormde N_2O uit de compost gestript.
- 2) Wanneer het experiment wordt gestart en er lucht door het filtermateriaal wordt geblazen, zullen in de compost aanvankelijk deels aërobe en deels anaërobe omstandigheden voorkomen. Als gevolg hiervan zal (onvolledige) nitrificatie optreden van de NH_3 die zich in de ventilatielucht

bevindt en eventueel ook van de $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ uit de compost zelf, al dan niet gevolgd door (onvolledige) denitrificatie. Nadat het filter gedurende twee weken is belucht zijn de condities in het filtermateriaal dusdanig aëroob geworden dat er geen sprake meer is van onvolledige nitrificatie of van denitrificatie. Hierdoor neemt de N_2O productie sterk af. Na 3 weken zijn de ingaande en uitgaande N_2O concentratie ongeveer gelijk (atmosferische concentratie).



Figuur 7 N_2O -concentratie van de ingaande en de uitgaande lucht van biofilter voor behandeling van ventilatielucht van drijfmestopslag.

5.3 Totale hoeveelheid broeikasgassen

De totale hoeveelheid broeikasgassen in de in- en uitgaande lucht van het biofilter kan als volgt worden berekend:

$$\text{BKG-totaal} = \text{BKG-CH}_4 + \text{BKG-N}_2\text{O}$$

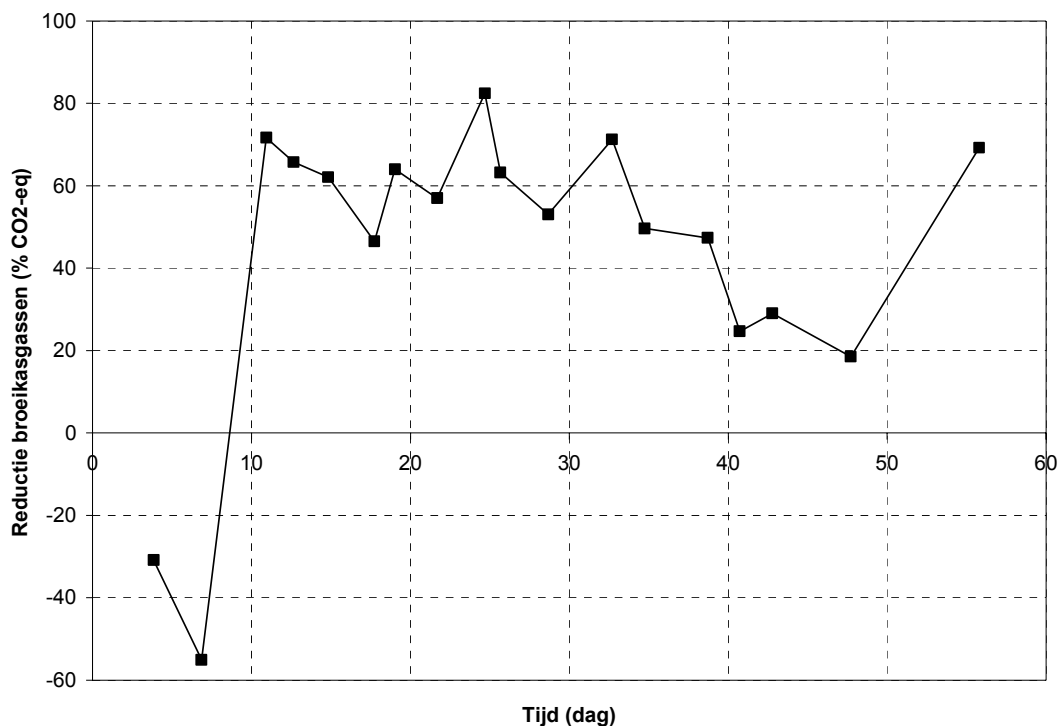
met:

$$\text{BKG-totaal} = \text{Totale hoeveelheid broeikasgassen (kg CO}_2\text{-eq/m}^3\text{)}$$

$$\text{BKG-CH}_4 = \text{CH}_4 \times \text{GWP-CH}_4$$

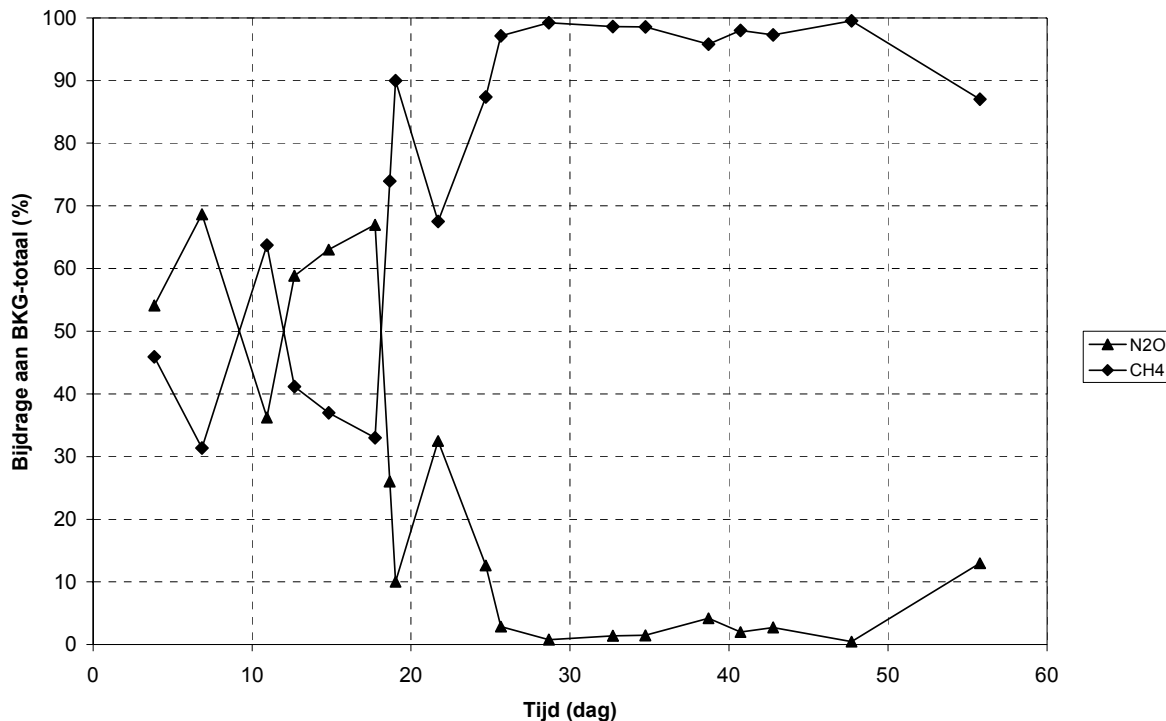
- BKG-N₂O = N₂O x GWP-N₂O
 CH₄ = Methaanconcentratie (kg/m³)
 GWP-CH₄ = Global Warming Potential methaan (= 21) (kg CO₂-eq/kg) (IPCC, 1996)
 N₂O = Lachgasconcentratie (kg/m³)
 GWP-N₂O = Global Warming Potential van lachgas (= 310) (kg CO₂-eq/kg)
 (IPCC, 1996)

De procentuele afname van BKG-totaal die optreedt wanneer de ventilatielucht in het biofilter wordt behandeld is weergegeven in Figuur 8. De concentratie van broeikasgas CO₂ wordt hierbij buiten beschouwing gelaten aangezien deze afkomstig is van biomassa en als zodanig deel uitmaakt van de korte C-kringloop. En wordt niet gecorrigeerd voor het feit dat ook schone buitenlucht een zekere achtergrondconcentratie van overige broeikasgassen (hoofdzakelijk N₂O) bevat.



Figuur 8 Procentuele afname van broeikasgasconcentratie (optelsom van CH₄ en N₂O in CO₂-eq.) als gevolg van behandeling van ventilatielucht van drijfmestopslag in biofilter.

Tijdens de eerste week is de totale broeikasgasverwijdering negatief als gevolg van de lachgasproductie in het biofilter (zie Figuur 7). Wanneer het biofilter na 3 weken stabiel draait, komt Figuur 8 nauwgezet overeen met het verloop van de methaanverwijdering uit Figuur 3. De reden daarvoor is dat de ingaande en uitgaande N_2O -concentratie na 3 weken praktisch aan elkaar gelijk zijn (atmosferische concentratie). In Figuur 9 wordt aangegeven wat de bijdrage van CH_4 resp. N_2O is aan de totale broeikasgashoeveelheid van de uitgaande lucht van het biofilter.

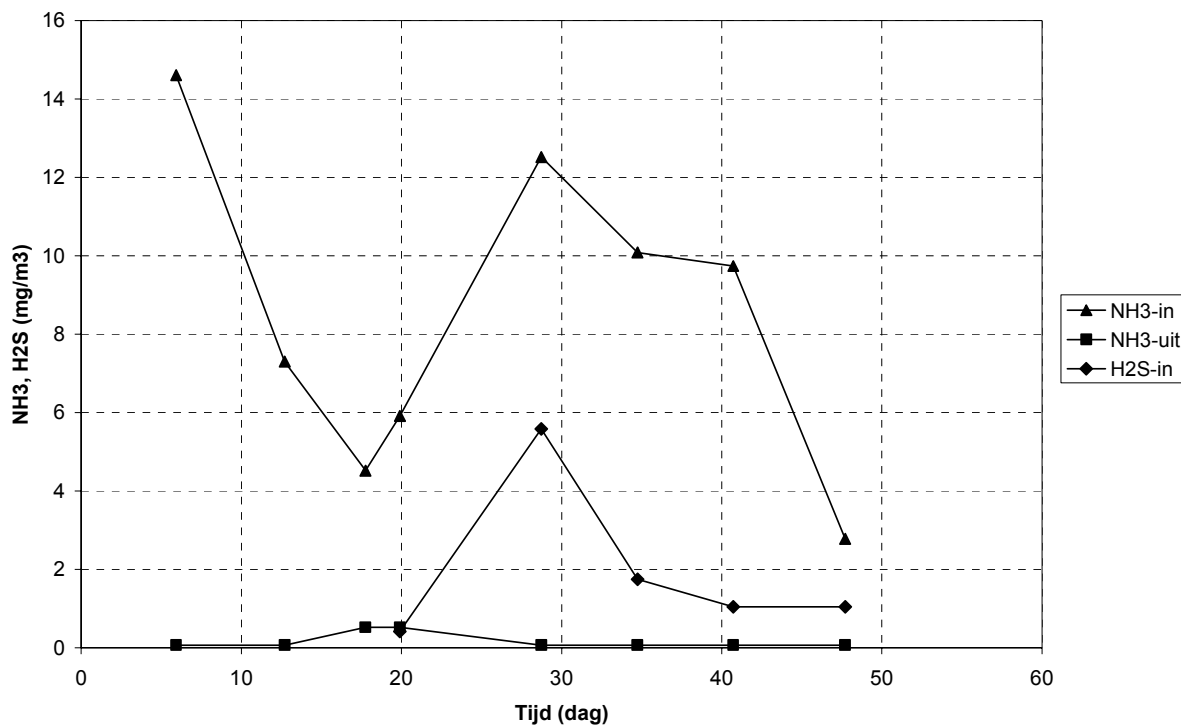


Figuur 9 Procentuele bijdrage van CH_4 resp. N_2O aan de totale broeikasgashoeveelheid (som van CH_4 en N_2O , uitgedrukt in CO_2 -eq.) in de uitgaande lucht van het biofilter.

Na 3 weken stijgt aandeel van CH_4 aan de totale broeikasgashoeveelheid tot ongeveer 95%; de overige 5% wordt betreft de atmosferische achtergrondconcentratie van N_2O . Het laatste meetpunt (dag 56) laat een stijging zien van het aandeel van N_2O (13%). Dit is het gevolg van een relatief lage methaanconcentratie in de uitgaande lucht en niet het gevolg van een hoge lachgasconcentratie. Aan het eind van het experiment wordt de luchtbelasting namelijk sterk verlaagd (zie Figuur 4) waardoor de methaanverwijdering sterk toeneemt.

5.4 Ammoniak, waterstofsulfide en geur

In Figuur 10 wordt het concentratieverloop van de in- en uitgaande lucht voor ammoniak en de ingaande lucht voor waterstofsulfide gegeven. De uitgaande waterstofsulfide is altijd lager dan de detectielimiet ($< 0,5 \text{ mg/m}^3$) en daarom niet weergegeven.



Figuur 10 NH₃-en H₂S-concentraties van ingaande en uitgaande lucht van biofilter voor behandeling van ventilatielucht van drijfmestopslag. H₂S-uit is lager dan detectielimiet ($< 0,5 \text{ mg/m}^3$) en niet weergegeven.

De ammoniakverwijdering bedraagt 90 - 100%. Dat wijst er op dat er in het biofilter, zoals verwacht, biologische omzetting van ammoniak optreedt oftewel nitrificatie. In het geval van nitrificatie zal op de lange duur ophoping van HNO₃ optreden waardoor op de lange duur het N-totaal gehalte van het filtermateriaal zal stijgen en de pH zal afnemen. Aangezien de luchtbelasting van het filter zeer laag is zal dit pas op zeer lange termijn meetbaar zijn of van invloed zijn op het functioneren van het biofilter. In Bommel & Werf (2002) is reeds berekend dat de ammoniakvracht ongeveer 100 maal zo laag is als de vracht die nog juist acceptabel wordt geacht met betrekking tot verzuring van een biofilter. In Tabel 6 wordt dan ook geen toename van N-totaal of afname van de pH gevonden wanneer de analyses van 1 week na opstart worden

vegeleken met 8 weken na opstart. Het is onduidelijk of er naast nitrificatie eventueel denitrificatie optreedt.

Uit de afname van de H₂S concentratie kan geconcludeerd worden dat er, zoals verwacht, oxidatie tot sulfaat optreedt. De verwijdering van waterstofsulfide bedraagt 100%. Ondanks de zuurvorming die gepaard gaat met oxidatie van waterstofsulfide, is verzuring van het filter niet merkbaar als gevolg van de zeer lage belasting van het filter.

Officiële metingen van de concentratie en hedonische waarde van de geur¹ van de in- en uitgaande luchtstroom van het biofilter zijn niet uitgevoerd. Reukwaarnemingen van de betrokken onderzoekers geven echter wel aan dat het geurkarakter van de lucht verandert. Terwijl de ingaande lucht door de onderzoekers wordt omschreven als 'mestlucht' wordt de geur van de uitgaande lucht omschreven als 'bosgeur'.

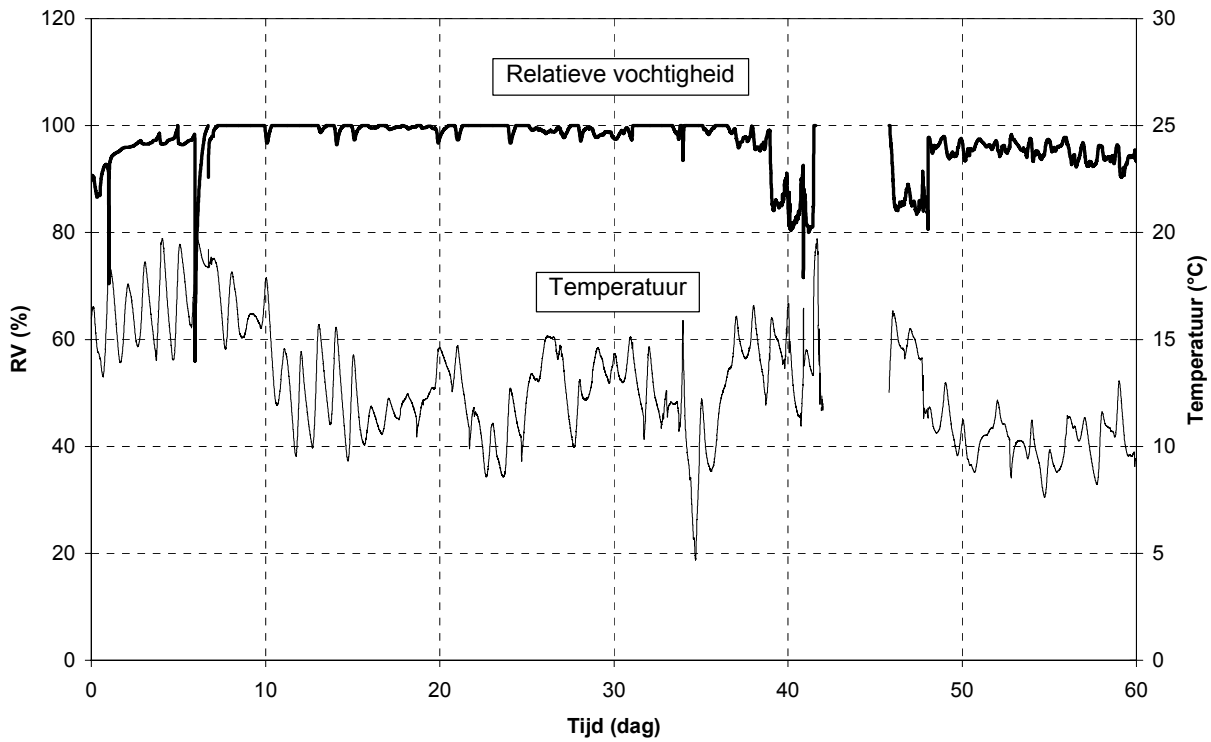
5.5 Temperatuur en relatieve vochtigheid

In Figuur 11 en Figuur 12 worden de temperatuur en de relatieve vochtigheid van de lucht voor en na het biofilter weergegeven.

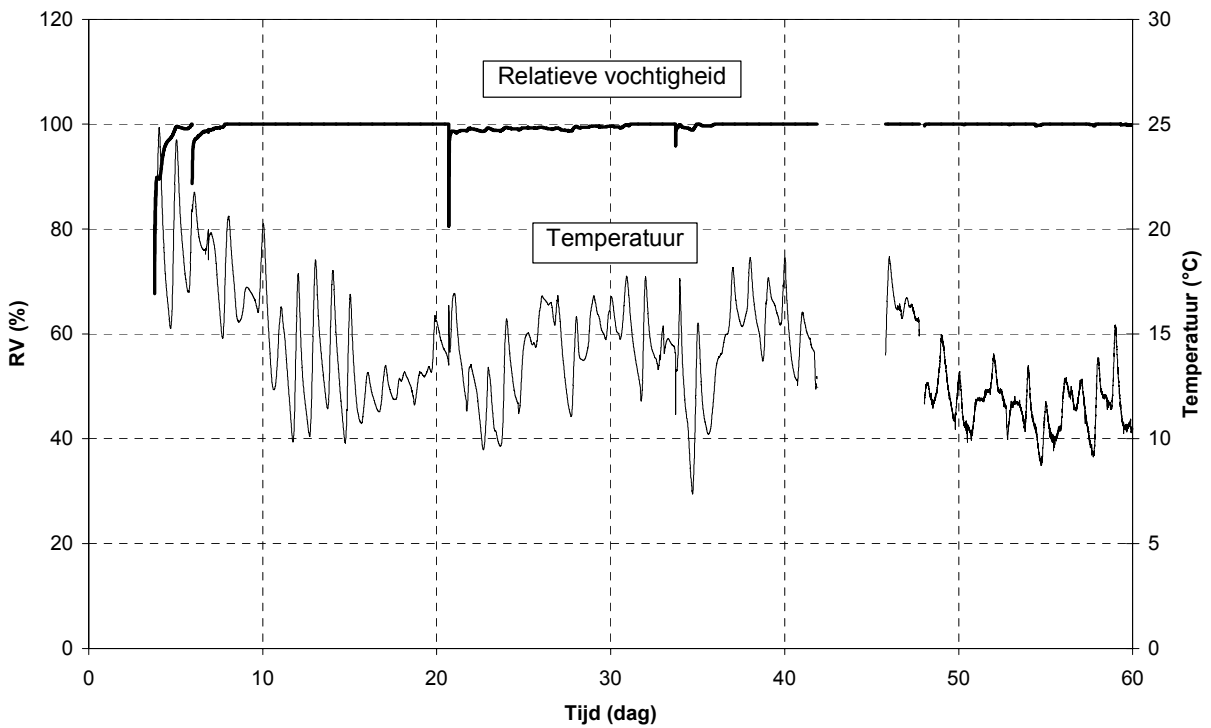
De temperatuur van de ingaande lucht is een afspiegeling van de buitentemperatuur en is gemiddeld 12,0°C (minimum: -3,4°C; maximum: 21,1°C). De temperatuur van de uitgaande lucht ligt 1,4°C hoger (gemiddeld 13,4°C). De bacteriën die zich in het biofilter bevinden zullen mesofiel van aard zijn, dat wil zeggen dat ze groeien bij temperaturen van ongeveer 10 tot 40°C en een optimum hebben bij ongeveer 30°C. De implicatie hiervan is dat hoe hoger de temperatuur van de ingaande lucht is (tot 30°C), hoe hoger de groeisnelheid van de bacteriën en dus de methaanverwijdering zal zijn. Wanneer de temperatuur van de lucht gedurende langere tijd lager dan 0°C is, kan bevrozing van het biofilter optreden waardoor de activiteit van de methanotrofen, en daardoor de methaanverwijdering, sterk zal afnemen. Nadat het biofilter weer ontdooid is, zal het waarschijnlijk enige tijd duren voordat het aantal actieve bacteriën en de methaanafbraakcapaciteit weer op het oude niveau is. Anderzijds zal een lagere omgevingstemperatuur waarschijnlijk eveneens een lagere methaanproductie in de mestopslag tot gevolg hebben aangezien de methanogene bacteriën op vergelijkbare wijze op temperatuurveranderingen reageren.

Wanneer de mestopslag ook in de zomer gevuld is, zal de hogere buitentemperatuur op den duur de mest enigszins opwarmen waardoor de methaanproductie zal toenemen. De hogere buitentemperatuur zal echter eveneens een hogere activiteit en groeisnelheid van de methanotrofen in het biofilter tot gevolg hebben.

¹ De hedonische waarde is de waardering van een geur, aangegeven op een schaal van uiterst aangenaam tot uiterst onaangenaam.



Figuur 11 Temperatuur (T) en relatieve vochtigheid (RV) van ingaande lucht van biofilter voor behandeling van ventilatielucht van drijfmestopslag.



Figuur 12 Temperatuur (T) en relatieve vochtigheid (RV) van uitgaande lucht van biofilter voor behandeling van ventilatielucht van drijfmestopslag.

Wanneer de mestopslag ook in de zomer gevuld is, zal de hogere buitentemperatuur op den duur de mest enigszins opwarmen waardoor de methaanproductie zal toenemen. De hogere buitentemperatuur zal echter eveneens een hogere activiteit en groeisnelheid van de methanotrofen in het biofilter tot gevolg hebben.

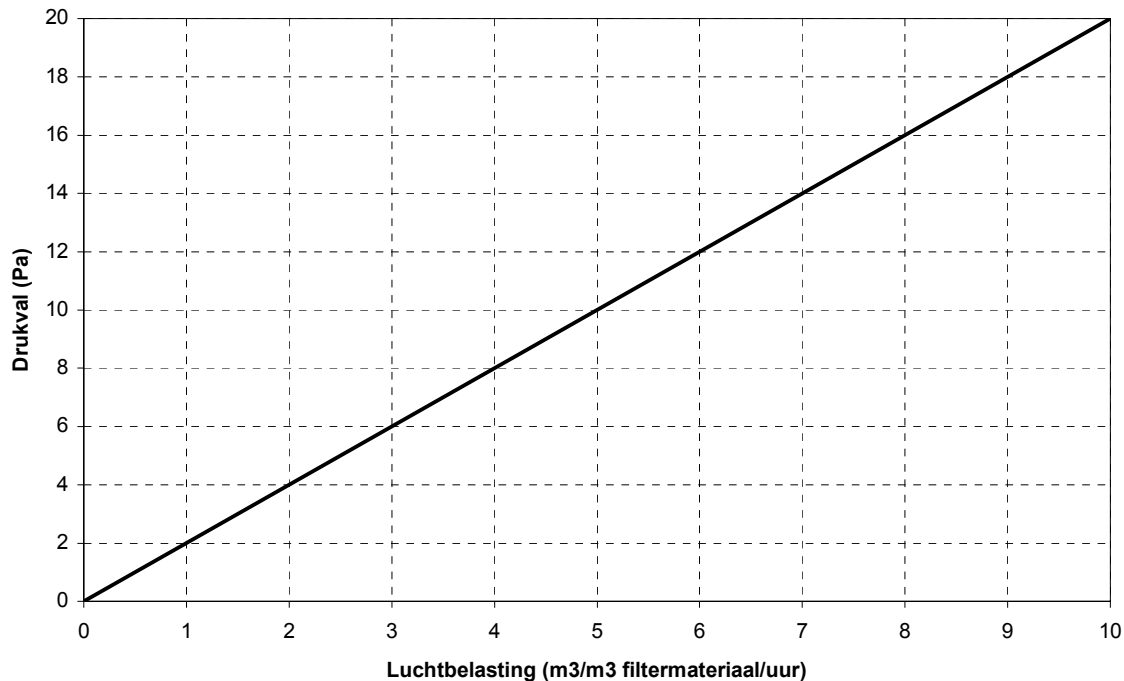
Daarom wordt verwacht dat het biofilter in principe gedurende het gehele jaar goed zal kunnen functioneren.

De meetapparatuur van de relatieve vochtigheid heeft een lage betrouwbaarheid bij waarden boven 90%. Aangezien zowel in de aanvoerleiding als de afvoerleiding van het biofilter gedurende de gehele meetperiode condensatie is waargenomen, wordt aangenomen dat beide luchtstromen met vocht verzadigd zijn. Uitgaand van 100% relatieve vochtigheid corresponderen de gemiddelde in- en uitgaande temperatuur van het biofilter met een enthalpietoename van 3,6 kJ/kg lucht. Bij een luchtbelasting van 0,75 (minimum) resp. 9 m³/m³ filtermateriaal/uur (maximum) is de toegevoegde energie daarmee gelijk aan 0,1 resp. 1,7 W. Deze energie wordt geleverd door een combinatie van de energie die vrijkomt bij de biologische oxidatie van methaan, de biologische oxidatie van organische stof uit het compost en de warmteproductie van de pomp die in dezelfde ruimte als het biofilter is opgesteld.

5.6 Drukval

Het verband dat gemeten wordt tussen de luchtbelasting en de drukval over het filter is lineair en wordt weergegeven in Figuur 13.

In vergelijking met reguliere biofiltratietoepassingen is de gemeten drukval zeer laag. Bij reguliere biofilters worden luchtbelastingen van enige honderden m³/m³ filtermateriaal/uur gehanteerd hetgeen resulteert in een drukval van enige honderden Pa. Bij dergelijke luchtbelastingen geldt dat de drukval over het biofilter evenredig is met het kwadraat van de superficiële luchtsnelheid (superficiële luchtsnelheid [m/s] = debiet [m³/s] / dwarsoppervlak reactor [m²]). Bij zeer lage luchtbelastingen, zoals het geval is in Figuur 13, wordt dit kwadratisch verband niet gevonden. Gezien het feit dat de drukval over het filter zeer laag is, zal het elektriciteitsverbruik van de pomp of ventilator die nodig is voor het afzuigen van de lucht veel lager zijn dan voor een regulier biofilter. Hierdoor zullen de exploitatiekosten van het biofilter (uitgedrukt per m³ reactor volume) relatief laag uitvallen.



Figuur 13 Drukval over biofilter voor de behandeling van ventilatielucht van drijfmestopslag.

5.7 Samenstelling filtermateriaal

Een week nadat het biofilter is opgestart en aan het einde van het experiment is het filtermateriaal uit de reactor bemonsterd op drie verschillende hoogten (onderste 55 cm, middelste 55 cm en bovenste 55 cm) en geanalyseerd. De resultaten daarvan worden in Tabel 6 weergegeven.

In het algemeen wordt aangenomen dat het droge stof gehalte van een biofilter dat gevuld is met alleen compost, onder normale condities 400 - 600 g/kg bedraagt. Aangezien het bemonsterde filtermateriaal een mengsel is van compost en perliet kan uit de droge stof analyses uit Tabel 6 niet afgeleid worden of het droge stof gehalte van het biofilter in orde is. Op basis van visuele inspectie lijkt het vochtgehalte van het mengmonster na 1 week en het bovenste en middelste monster van het filtermateriaal na 8 weken in orde te zijn. Het onderste monster van het filtermateriaal na 8 weken is aan de natte kant. De pH, EC en N, P en K gehalten van het filtermateriaal hebben waarden die gangbaar zijn voor een biofilter.

In het algemeen geldt dat een niet geadapteerd biofilter per gram droge stof $10^2 - 10^4$ bacteriën bevat die een specifieke stof afbreken, terwijl een goed werkend biofilter per gram droge stof een aantal van $10^8 - 10^9$ van deze bacteriën bevat. Uit de bacterietellingen van het filtermateriaal uit Tabel 6 blijkt dat het filtermateriaal redelijk hoge aantallen methanotrofe bacteriën bevat ($10^7 - 10^8$ per gram droge stof). Van stratificatie van methanotrofen in het filtermateriaal is geen sprake aangezien de aantallen methanotrofen boven, midden en onder in het filter vergelijkbaar zijn (de meetnauwkeurigheid van de MPN-methode is ongeveer een factor 10).

Tabel 6 Samenstelling filtermateriaal

Omschrijving	Na 1 week ⁽¹⁾	Na 8 weken (einde experiment) ⁽²⁾			mengmonster ⁽³⁾
	mengmonster ⁽³⁾	onder	midden	boven	
Droge stof (g/kg)	355	345	392	391	
As (g/kg)	247	247	253	229	
N-totaal (g/kg)	2,06				1,97
N-NH ₄ (g/kg)					0,2
N-NO ₃ (g/kg)					0,14
N-NO ₂ (g/kg)					< 0,001
P-totaal (g/kg)	0,51				0,43
K-totaal (g/kg)					1,49
EC (mS/cm) ⁽⁴⁾	1,6	2,0		1,8	
pH ⁽⁴⁾	6,5	6,9	6,8	6,6	
Aantal methanotrofen (per gram droge stof) ⁽⁵⁾		4×10^7	2×10^7	1×10^8	

⁽¹⁾ Monsternamedatum: 3 oktober 2002.

⁽²⁾ Monsternamedatum: 13 november 2002.

⁽³⁾ Mengmonster van deelmonsters op massabasis.

⁽⁴⁾ Voor het uitvoeren van de bepaling is het monster met 4 delen water verdund.

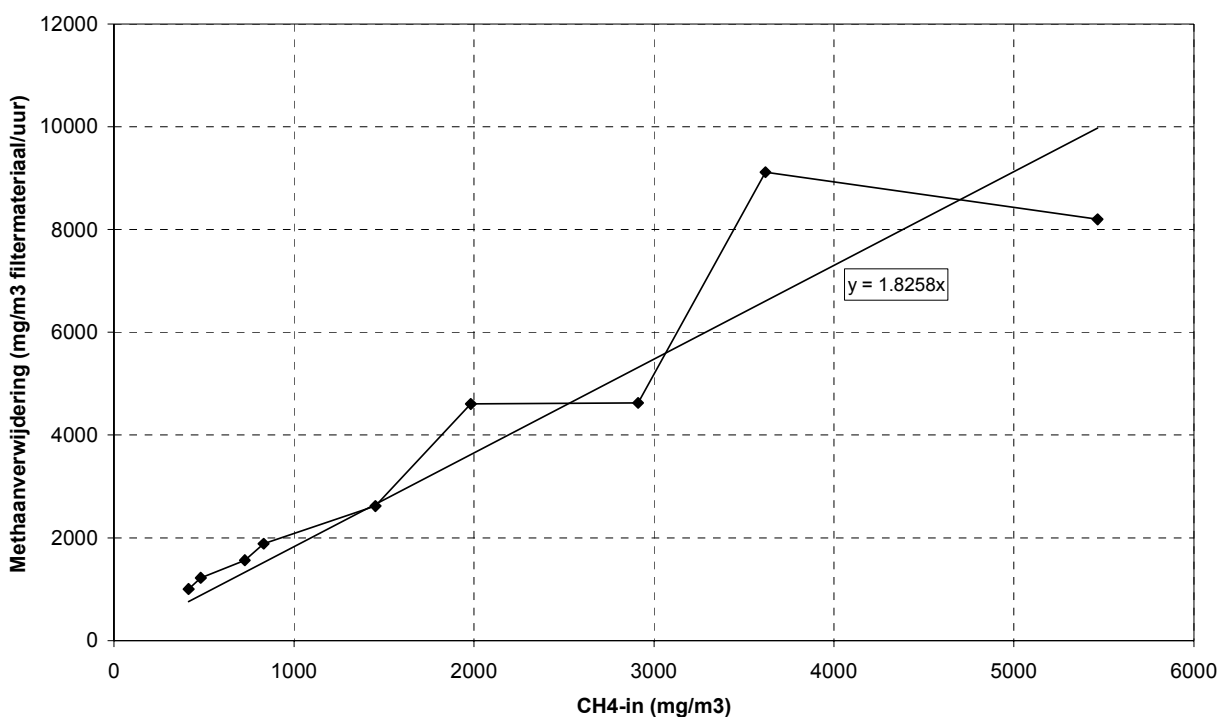
⁽⁵⁾ Bepaald middels de MPN-methode, Most Probable Number.

5.8 Analyse van resultaten

De resultaten van het onderzoek zijn gebaseerd op de behandeling van lucht die afkomstig is van vergistende varkensdrijfmest. Alhoewel de methaanproductiesnelheid sterk kan verschillen van mestsoort tot mestsoort zijn er geen aanwijzingen dat de karakteristieken van het geproduceerde biogas dusdanig afwijken dat dit consequenties zou hebben voor het (zeer laag belaste) biofilter. Daarom wordt ervan uitgegaan dat de resultaten van dit onderzoek ook representatief zijn voor de behandeling van ventilatielucht afkomstig van mestopslagen gevuld met andere mestsoorten, zoals koeidrijfmest.

Om inzicht te krijgen in de maximale methaanafbraakcapaciteit van het biofilter worden de resultaten uit Figuur 3 en Figuur 4 aan een nadere analyse onderworpen. De eerste periode

(dag 0 - 18) wordt sterk beïnvloed door het ingroeien van biomassa (opstartperiode) en daarom buiten beschouwing gelaten. De periode dag 18 - 25 wordt buiten beschouwing gelaten omdat de experimentele condities afwijken van de periode dag 25 - 60 (vanaf dag 25 is het deksel van de mestopslag met een waterslot afgesloten). De analyse wordt daarom beperkt tot de resultaten van dag 25 - 60 waarvoor wordt aangenomen dat deze periode een goed beeld geeft van een stabiele werking van het biofilter. Het verwijderingsrendement van methaan bedraagt in deze periode 19 - 73%. In Figuur 14 wordt de methaanverwijdering van het biofilter uitgezet tegen de methaanconcentratie in de ingaande lucht zoals deze gemeten zijn in de periode van dag 25 tot dag 60. Eveneens is een lineaire regressielijn getekend door (0;0).



Figuur 14 Methaanverwijdering versus methaanconcentratie van ingaande lucht van biofilter voor behandeling van ventilatielucht van drijfmestopslag (dag 25 - 60). Lineaire regressielijn door (0;0).

Uit Figuur 14 blijkt dat er in het concentratiegebied van 400 tot 5.500 mg CH₄/m³ een lineair verband is tussen de methaanconcentratie in de ingaande lucht is en de methaanverwijdering. Dit verband wordt beschreven als:

$$MV = 1,8258 \times CH_{4in}$$

[Formule 1]

met:

MV : methaanverwijdering (mg/m^3 filtermateriaal/uur)

CH_4 in : methaanconcentratie ingaande lucht (mg/m^3)

Het feit dat de methaanverwijdering afhangt van de ingaande concentratie en niet van de methaanvracht (product van methaanconcentratie en luchtdebiet), duidt er op dat de methaanverwijdering wordt beperkt door de lage oplosbaarheid van CH_4 en niet door een eventuele beperkte methaanafbraakcapaciteit van de aanwezige biomassa.

De verklaring hiervoor is dat wanneer de methaanconcentratie in de ingaande lucht hoger wordt, de methaanconcentratie in de waterfase evenredig hoger zal worden volgens de wet van Henry (zie hoofdstuk 3.2). Aangezien de bacteriën hun substraat opnemen uit de waterfase zal de methaanverwijdering (uitgedrukt als mg/m^3 filtermateriaal/uur) dan eveneens hoger zijn, mits de methaanafbraakcapaciteit van de aanwezige bacteriën hoog genoeg is. Uit het gevonden verband in Figuur 14 kan daarom geconcludeerd worden dat de methaanafbraakcapaciteit van de aanwezige biomassa niet beperkend is voor de gemeten methaanverwijdering.

Wanneer in een biofilter een goed oplosbare stof (hoge Henry constante) wordt verwijderd uit de luchtstroom hangt de afbraak enerzijds af van de hoeveelheid substraat die wordt aangeboden (vracht) en anderzijds van de afbraakcapaciteit van de aanwezige biomassa. In dat geval wordt het lineaire verband van Figuur 14 niet gevonden.

Tijdens het onderzoek varieerde zowel de ingaande methaanconcentratie (zie Figuur 3) als het luchtdebiet (zie Figuur 4) sterk. Desondanks wordt in Figuur 14 een rechte lijn gevonden hetgeen erop wijst dat het biofilter snel reageert op veranderende concentraties en debieten. Wanneer er sprake zou zijn van langdurige adaptatie, telkens wanneer de concentratie of het debiet verandert, zou dit de gemeten methaanverwijdering sterk beïnvloeden waardoor er geen lineair verband tussen methaanverwijdering en methaanconcentratie zou zijn gevonden. Met betrekking tot veranderingen van het luchtdebiet betekent dit dat de adaptatietijd van het biofilter in ieder geval kleiner is dan 24 uur, aangezien de meting van de in- en uitgaande methaanconcentratie plaatsvond 24 uur na de verandering van het luchtdebiet. Met betrekking tot veranderingen van de methaanconcentratie kan niet gezegd worden welke orde van grootte de adaptatietijd van het biofilter heeft aangezien de methaanconcentratie niet on-line is gemeten. Hierdoor is onduidelijk hoe het concentratieverloop er in detail uitziet en op welke manier momentane veranderingen van ingaande concentratie doorwerken op de gemeten uitgaande concentratie. Geconcludeerd kan worden dat het biofilter goed in staat is om lucht te behandelen waarvan de concentratie en het debiet in de tijd sterk varieert.

Over het biofilter kan voor methaan de volgende massabalans (mg/m^3 filtermateriaal/uur) worden opgesteld:

$$\text{CH}_4\text{in} \times Q / VF - MV = \text{CH}_4\text{uit} \times Q / VF \quad [\text{Formule 2}]$$

met:

- CH_4in : methaanconcentratie ingaande lucht (mg/m^3)
- Q : luchtdebiet (m^3/uur)
- MV : methaanverwijdering (mg/m^3 filtermateriaal/uur)
- VF : volume filtermateriaal (m^3 filtermateriaal)
- CH_4uit : methaanconcentratie uitgaande lucht (mg/m^3)

En:

$$L = Q / VF \quad [\text{Formule 3}]$$

met:

- L : luchtbelasting (m^3/m^3 filtermateriaal/uur)
- Q : luchtdebiet (m^3/uur)
- VF : volume filtermateriaal (m^3 filtermateriaal)

Wanneer in [Formule 2] de term MV wordt vervangen door [Formule 1] en de term Q / VF wordt vervangen door [Formule 3] volgt:

$$(\text{CH}_4\text{in} - \text{CH}_4\text{uit}) / \text{CH}_4\text{in} = 1,8258 / L \quad [\text{Formule 4}]$$

met:

- CH_4in : methaanconcentratie ingaande lucht (mg/m^3)
- CH_4uit : methaanconcentratie uitgaande lucht (mg/m^3)
- L : luchtbelasting (m^3/m^3 filtermateriaal/uur)

In [Formule 4] is $(\text{CH}_4\text{in} - \text{CH}_4\text{uit}) / \text{CH}_4$ gelijk aan de definitie van het methaanverwijderingsrendement, uitgedrukt als fractie van de ingaande methaanconcentratie.

Wanneer het methaanverwijderingsrendement uitgedrukt wordt in procenten wordt dit:

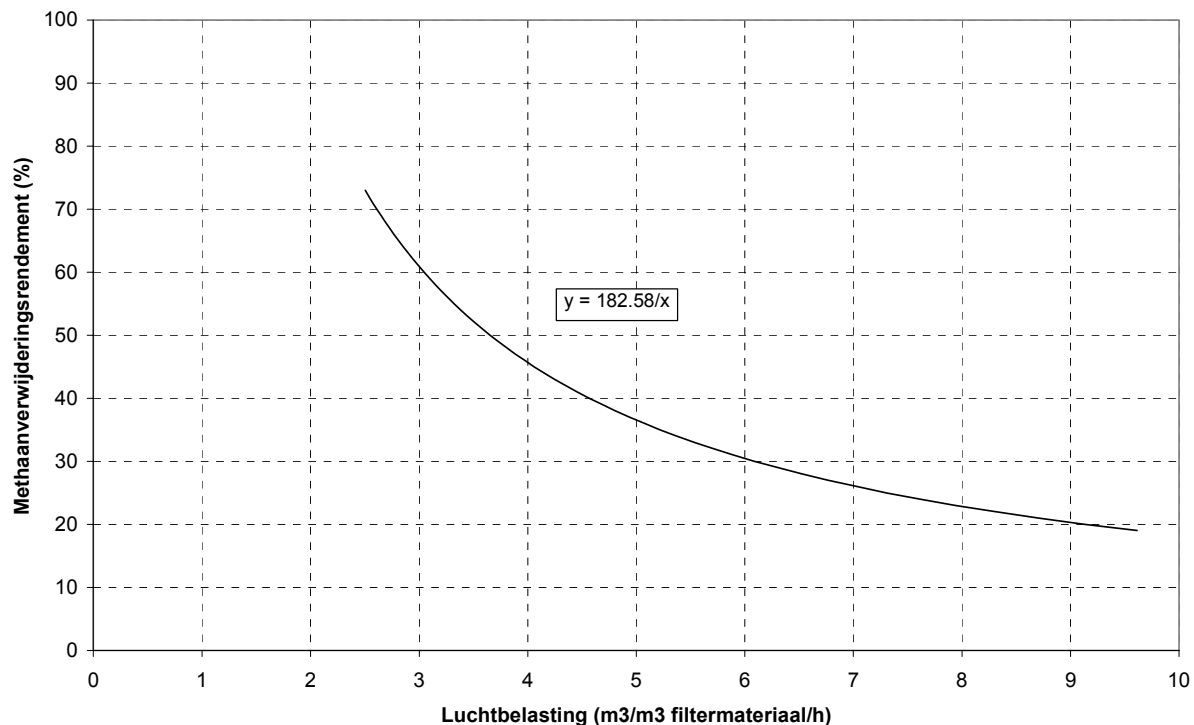
$$\text{MVR} = 182,58 / L \quad [\text{Formule 5}]$$

met:

MVR : methaanverwijderingsrendement (%)

L : luchtbelasting (m^3/m^3 filtermateriaal/uur)

In Figuur 15 is het verband tussen methaanverwijderingsrendement (%) en luchtbelasting (m^3/m^3 filtermateriaal/uur) uit [Formule 5] grafisch weergegeven. De grafiek wordt beperkt tot het gebied van 19 - 73% methaanverwijdering aangezien de metingen in periode dag 25 - 60 binnen deze range vallen.



Figuur 15 Methaanverwijderingsrendement versus luchtbelasting van biofilter voor behandeling van ventilatielucht van drijfmestopslag (CH_4 in: 400 - 5500 mg/m^3).

Het verband uit Figuur 15 geeft aan dat het methaanverwijderingsrendement (%) alleen afhangt van de aangelegde luchtbelasting en niet van de methaanconcentratie in de te behandelen lucht; dit is het directe gevolg van de lineaire relatie uit Figuur 14. De doelstelling van het project om

een biofilterinstallatie te ontwikkelen die een methaanverwijdering van 50% realiseert, kan dus ruimschoots gehaald worden mits het filter voldoende groot is.

5.9 Rekenvoorbeeld

Aangenomen wordt dat de methaanproductie uit een drijfmestopslag, voor zowel koeien- als varkensdrijfmest, ongeveer 40 g/m^3 mest/dag bedraagt (zie Tabel 3) en niet afhangt van het ventilatiedebiet. Uitgaand van een mestopslag met een volume van 1000 m^3 bedraagt de methaanproductie dan $1,7 \cdot 10^6 \text{ mg/uur}$.

Voor het luchtdebiet geldt:

$$Q = MP / CH_{4in} \quad \text{[Formule 6]}$$

met:

Q : luchtdebiet (m^3/uur)

MP : methaanproductie ($= 1,7 \cdot 10^6$) (mg/uur)

CH_{4in} : methaanconcentratie ingaande lucht (mg/m^3)

Wanneer L wordt vrijgemaakt uit [Formule 5] en tezamen met [Formule 6] wordt ingevuld in [Formule 3] volgt:

$$VF = MP / (CH_{4in} \times 182,58) \times MVR = 9,1 \times 10^3 / CH_{4in} \times MVR \quad \text{[Formule 7]}$$

met:

VF : volume filtermateriaal (m^3 filtermateriaal)

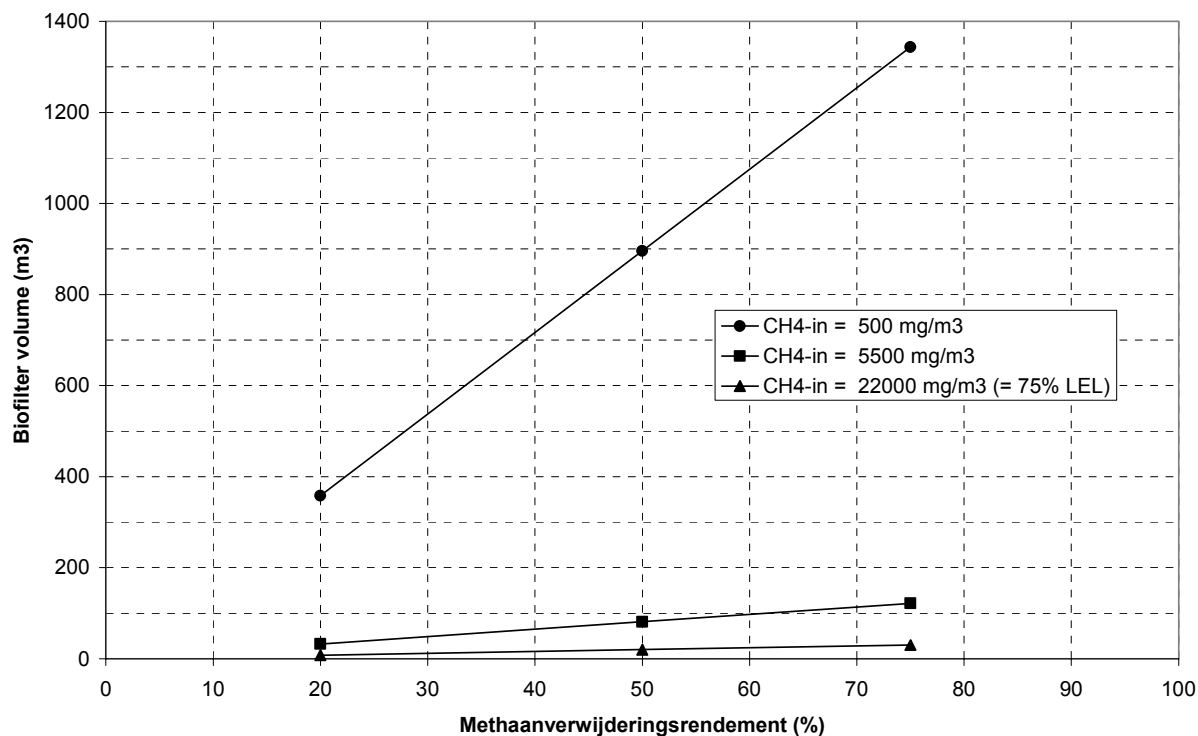
MP : methaanproductie ($= 1,7 \cdot 10^6$) (mg/uur)

CH_{4in} : methaanconcentratie ingaande lucht (mg/m^3)

MVR : methaanverwijderingsrendement (%)

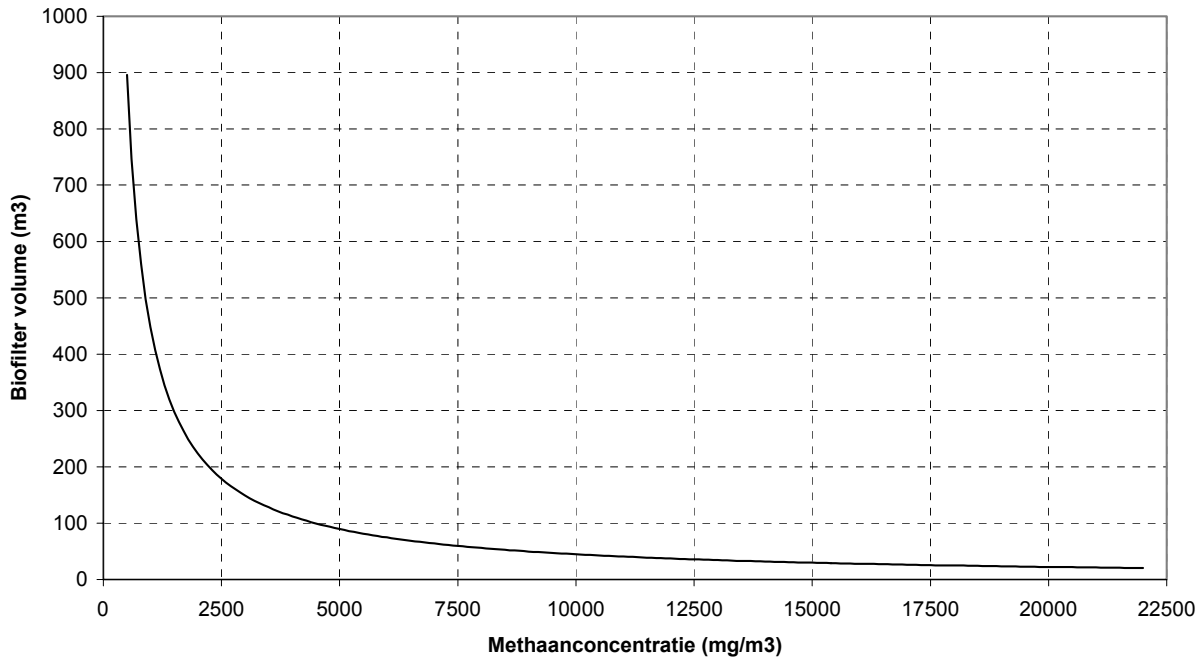
Het verband tussen het methaanverwijderingsrendement en het hiervoor benodigde biofiltervolume ([Formule 7]) wordt in Figuur 16 gegeven voor een aantal methaanconcentraties. Wanneer de methaanconcentratie van de ingaande lucht 500 mg/m^3 (de minimale concentratie uit Figuur 14) bedraagt, kan afgelezen worden dat een biofilter van 900 m^3 noodzakelijk is om een methaanverwijdering van 50% te bereiken. Wanneer de methaanconcentratie van de ingaande lucht 5500 mg/m^3 (de maximale concentratie uit Figuur 14) bedraagt, kan afgelezen worden dat een biofilter van 80 m^3 reeds voldoende is om een methaanverwijdering van 50% te

bereiken. Evenzo kan de benodigde biofiltergrootte worden afgelezen voor andere verwijderingspercentages. In Figuur 17 wordt het verband gegeven tussen biofiltervolume en methaanconcentratie voor een methaanverwijderingsrendement van 50%.



Figuur 16 Biofiltervolume versus methaanverwijderingsrendement voor verschillende methaanconcentraties van ingaande lucht van biofilter dat ventilatielucht van drijfmestopslag (1000 m³) behandelt.

Uit Figuur 16 en 17 blijkt dat hoe hoger de ingaande methaanconcentratie is, hoe kleiner het benodigde biofilter zal zijn om een bepaald methaanverwijderingspercentage te bereiken. Bij de behandeling van ventilatielucht van een mestopslag in een biofilter dient dus gestreefd te worden naar een zo hoog mogelijke methaanconcentratie. Dit kan bereikt worden door de mestopslag beter van de buitenlucht af te sluiten en de hoeveelheid af te zuigen lucht zo af te stellen, dat door de optredende verdunning met buitenlucht juist de gewenste concentratie wordt bereikt. De methaanconcentratie van de ventilatielucht kan redelijkerwijs verhoogd worden tot 75% van de Lower Explosion Limit (LEL) (= 22.000 mg/m³ of 3,3 vol%) zonder dat een explosiegevaarlijke toestand wordt bereikt. Zoals in Tabel 2 reeds vermeld is, zijn in de praktijk methaanconcentraties gemeten van 130 - 22.000 mg/m³ (200 - 33.000 ppm) in de 'headspace' van mestopslagen.



Figuur 17 Biofiltervolume versus methaanconcentraties van ingaande lucht bij een methaanverwijderingsrendement van 50% van biofilter dat ventilatielucht van drijfmestopslag (1000 m³) behandelt.

In 3.2.2 is reeds toegelicht dat volgens de wet van Henry de hoeveelheid opgelost methaan recht evenredig is met de methaanconcentratie van de lucht (in evenwicht). Dit betekent dat de hoeveelheid opgelost methaan 0,81 mg/l bedraagt bij een methaanconcentratie in de ingaande lucht van 22.000 mg/m³. Wanneer bovendien aangenomen wordt dat de hoeveelheid methanotrofen in het biofilter groot genoeg is om de grotere hoeveelheid methaan af te breken, kan Figuur 14 geëxtrapoleerd worden. Uit Figuur 16 en 17 kan dan afgelezen worden dat bij een methaanconcentratie van 22.000 mg/m³ een biofilter van 20 m³ reeds voldoende is om een methaanverwijdering van 50% te bereiken. Om er zeker van te zijn dat het lineaire verband uit Figuur 14 inderdaad blijft gelden bij dergelijke hoge concentraties dient aanvullend onderzoek te worden uitgevoerd.

In de praktijk worden biofilters gebouwd tot een maximale hoogte van circa 3 meter. Een dergelijk biofilter bestaat uit 3 boven elkaar geplaatste lagen filtermateriaal van elk 1 meter hoogte. Het benodigde grondoppervlak van het biofilter bedraagt dan 1/3 m² per m³ biofiltervolume.

6 CONCLUSIES

1. In pilot-onderzoek is aangetoond dat biofiltratie een succesvolle methode is voor de verwijdering van methaan (CH_4) uit ventilatielucht van een drijfmestopslag (verwijdering tot 85%). Het biofilter dat hiervoor gebruikt wordt is zeer eenvoudig van uitvoering en behoeft nauwelijks processturing.
2. Bij een mestopslag van 1000 m^3 en een gewenste methaanverwijdering van 50%, bedraagt de benodigde grootte van een biofilter 20 - 80 m^3 bij een voldoende hoge methaanconcentratie in de te behandelen lucht. De hoogte van de methaanconcentratie kan in principe ingesteld worden door het afregelen van het ventilatiedebiet en het openen of sluiten van aanwezige ventilatieopeningen in de afdekking van de mestopslag. Het benodigde grondoppervlak van het biofilter bedraagt ongeveer $1/3 \text{ m}^3$ per m^3 biofiltervolume.
3. De bijdrage van methaanverwijdering aan de totale broeikasgasreductie (methaan én lachgas) door het biofilter bedraagt ruim 90%.
4. De verwijdering van ammoniak (NH_3) in het biofilter bedraagt 90 - 100%.
5. De verwijdering van waterstofsulfide (H_2S) in het biofilter bedraagt 100%.
6. Het geurkarakter van de ventilatielucht verandert door het biofilter van 'mestlucht' in 'bosgeur'.

7 AANBEVELINGEN VOOR NADER ONDERZOEK

Nader onderzoek is gewenst om de volgende vragen te beantwoorden:

1. *Verhoging beschikbaarheid methaan*

Een beperkende factor bij het behandelen van methaanhoudende lucht is de beperkte wateroplosbaarheid van methaan, waardoor er slechts weinig methaan beschikbaar is voor de bacteriën. Op welke manier kan de beschikbaarheid van methaan voor de bacteriën verhoogd worden? Is het mogelijk een apolair oplosmiddel op te mengen met het filtermateriaal waardoor de oplosbaarheid van het methaan als het ware wordt verhoogd? Wanneer de oplosbaarheid van methaan verhoogd wordt, kan volstaan worden met een kleiner biofilter. Mogelijk wordt behandeling van ventilatielucht van stallen dan eveneens mogelijk. De toepassingsmogelijkheden van het biofilter voor emissiereductie van overige broeikasgassen zou hierdoor sterk toenemen.

2. *Gedrag bij hoge methaanconcentraties*

Geldt er bij methaanconcentraties tussen 5500 en 22000 mg/m³ inderdaad een lineair verband tussen methaanverwijdering (mg/m³ filtermateriaal/uur) en methaanconcentratie (mg/m³) zoals aangenomen wordt in het rapport? De beantwoording van deze vraag is bepalend voor de benodigde grootte van het biofilter en daarmee bepalend voor de kosten van het proces.

3. *Optimalisatie filtermateriaal*

Kan een vulmateriaal worden ontwikkeld met een hogere activiteit van methanotrofen? Wat is de standtijd (levensduur) van het filtermateriaal? Kan deze verlengd worden? Het antwoord op deze vraag is medebepalend voor de exploitatiekosten van het biofilter.

4. *Optimalisatie procesvoering*

Kan door middel van processturing en -beïnvloeding een betere werking of hogere belasting van het filter bereikt worden (bijv. door toevoeging van nutriënten tijdens de procesvoering)? Optimalisatie van de procesvoering kan zo resulteren in een kleiner en/of beter beheersbaar biofilter.

5. *Geurreductie*

Welke geurreductie wordt door het biofilter gerealiseerd (zowel met betrekking tot geurconcentratie als geurbeleving)? Wanneer de geurreductie is gekwantificeerd bestaat er, naast de emissiereductie van methaan, ammoniak en waterstofsulfide, een extra argument voor de toepassing van het biofilter.

5. *Temperatuur*

Wat is de werking van het biofilter 'jaarrond'? In hoeverre wordt de methaanproductie uit de mestopslag en de methaanverwijdering in het biofilter beïnvloed door de buitentemperatuur? Deze kennis is nodig om de werking van het filter gedurende het gehele jaar te garanderen.

LITERATUUR

Abalos R; E Erdmann; HA Destefanis (2003) Surface modifications of volcanic glasses (perlites) by water vapor. *Latin American Applied Research* 33, pp. 59-62.

Anderson GA; RJ Smith; DS Bundy; EG Hammond (1987) Model to predict gaseous contaminants in swine confinement buildings. *J. Agric. Engng Res.* 37, pp. 235-253 (reference 10-16).

Asijee K (1993) *Handboek voor de rundveehouderij*. 6de herziene druk. Informatie en Kennis Centrum Veehouderij, Lelystad, 629 p. ISBN: 90-800999-2-9.

Bemmel van JBM; AW van der Werf (2002) *Haalbaarheidsstudie naar de toepassing van biologische technieken voor de behandeling van methaan houdende lucht uit stallen en mestopslagen*. Projectcode 2000-1366. Bioclear, Groningen.

Brunink JAJ (2002) *Methaanemissie-reductie in de veeteelt. Toepasbaarheid van biologische luchtfiltratie*. Document no. SPE-MTV-RP001. Stork Product Engineering, Amsterdam.

Guingand N; R Granier; P Massabie (1997) Characterization of air extracted from pig housing: effects of the presence of slurry and the ventilation rate. In: *Proceedings of the international symposium on ammonia and odour control from animal production facilities*, pp. 49-55. October 6-10, 1997, Vinkeloord, The Netherlands.

Groot Koerkamp PWG (1997) Climatic conditions and aerial pollutants in and emissions from commercial animal production systems in The Netherlands. In: *Proceedings of the international symposium on ammonia and odour control from animal production facilities*, pp. 139-144. October 6-10, 1997, Vinkeloord, The Netherlands.

Hansen MN (s.a.) Danish Institute of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering, Denmark.

Husted S (1994) Seasonal variation in methane emission from stored slurry and solid manures. *Journal of Environmental Quality*, 23: 3, pp. 585-592.

IPCC (1996) *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change; J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell, eds. Cambridge University Press. Cambridge, U.K.

Meyer DJ; HB Manbeck (1986) Dust levels in mechanically ventilated swine barns. ASAE paper no. 86-4042. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, USA.

Mol G (2003) *Persoonlijke mededeling*. Cijfers zijn gebaseerd op database van door IMAG gemeten ventilatiedebieten (gepubliceerd in diverse rapporten). IMAG, Wageningen.

Ogink NWM; PN Lens (2000) *Geuremissies uit de veehouderij*. IMAG-nota V 2000-11, 36 pp.

RIVM & CBS (2001) Milieucompendium 2000: het milieu in cijfers. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven.

Sander R (1999) Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry (Version 3) <http://www.mpch-mainz.mpg.de/~sander/res/henry.html>

Schulte DD (1997) Critical Parameters for Emissions. In: Proceedings of the international symposium on ammonia and odour control from animal production facilities, p. 23-34. October 6-10, 1997, Vinkeloord, The Netherlands.

Uenk GH; TGM Demmers; MG Hissink (1993) Luchtsamenstelling onder de overkapping van meststapels vóór en na het mixen van de mest (in Dutch). Report 93-10. IMAG-DLO, Wageningen, The Netherlands.

Werf van der AW (2002) Resultaten van het laboratoriumonderzoek naar de toepassing van biologische technieken voor de behandeling van methaan houdende lucht uit stallen en mestopslagen. Projectcode 2000-1366. Bioclear, Groningen.

Williams AG; E Nigro (1997) Covering slurry stores and effects on emissions of ammonia and methane. In: Proceedings of the international symposium on ammonia and odour control from animal production facilities; pp. 421-428. October 6-10, 1997, Vinkeloord, The Netherlands.