

Wageningen UR Livestock Research

Partner in livestock innovations



Rapport 313

Maatregelen ter vermindering van
fijnstofemissie uit de pluimveehouderij:
indicatieve evaluatie van biofiltratie als
potentiële fijnstofreductietechniek

September 2010 (herziene versie mei 2015)



LIVESTOCK RESEARCH

WAGENINGEN UR

Colofon

Uitgever

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

Redactie

Communication Services

Copyright

© Wageningen UR Livestock Research, onderdeel van Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek, 2010

Overname van de inhoud is toegestaan, mits met duidelijke bronvermelding.

Aansprakelijkheid

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

Wageningen UR Livestock Research en Central Veterinary Institute, beiden onderdeel van Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek vormen samen met het Departement Dierwetenschappen van Wageningen University de Animal Sciences Group van Wageningen UR (University & Research centre).

Losse nummers zijn te verkrijgen via de website.



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

Abstract

In this study biofiltration is indicatively evaluated for its potential to remove fine dust from exhaust air of poultry houses. From this study it is concluded that biofiltration can be effective and applicable.

Keywords

Biofiltration, biofilter, fine dust, PM10, PM2.5, ammonia, emission, poultry

Referaat

ISSN 1570 - 8616

Auteurs

A. Winkel
J.M.G. Hol
N.W.M. Ogink

Titel

Maatregelen ter vermindering van fijnstofemissie uit de pluimveehouderij: indicatieve evaluatie van biofiltratie als potentiële fijnstofreductietechniek
Rapport 313

Samenvatting

In deze studie wordt de biofiltratie techniek indicatief beoordeeld op het vermogen om de ventilatielucht van pluimveestallen te zuiveren van fijnstof. Uit dit onderzoek blijkt dat biofiltratie een perspectievolle techniek is.

Trefwoorden

Biofiltratie, biofilter, biobed, fijnstof, PM10, PM2,5, emissie, pluimvee



Rapport 313

Maatregelen ter vermindering van
fijnstofemissie uit de pluimveehouderij:
indicatieve evaluatie van biofiltratie als
potentiële fijnstofreductietechniek

Measures to reduce fine dust emission from
poultry: indicative evaluation of biofiltration as
potential fine dust reduction technique

A. Winkel
J.M.G. Hol
N.W.M. Ogink

September 2010 (herziene versie mei 2015)

Samenvatting

Om te kunnen voldoen aan de Europese norm voor fijnstofconcentraties in de buitenlucht dienen in Nederland maatregelen te worden doorgevoerd die de uitstoot van fijnstof uit belangrijke bronnen terugdringen. In dit kader is door het ministerie van LNV verzocht om het uitwerken van een plan van aanpak voor het ontwikkelen van praktijkrijpe bedrijfsoplossingen voor het terugdringen van de fijnstofemissie uit de pluimveehouderij. In het kader van het plan van aanpak worden in dit deelproject beoordelingen verricht van de potentiële effectiviteit en technische en economische haalbaarheid van stofreducerende concepten voor pluimveestallen.

In dit onderzoek wordt biofiltratie beoordeeld als potentiële stofreductietechniek. Een biofilter is een 'end of pipe' techniek waarbij de ventilatielucht door een pakket van organisch filtermateriaal wordt gestuwd. In het filterpakket worden componenten als geur en ammoniak uit de lucht geabsorbeerd en afgebroken.

In hoofdstuk twee wordt een algemene beschrijving gegeven van het systeem, het werkingsprincipe en de toepassing van biofilters in de veehouderij. Door middel van een literatuurstudie wordt onderzocht wat het potentiële verwijderingsrendement van biofilters voor fijnstof is. In hoofdstuk drie worden de resultaten weergegeven van een indicatieve rendementsmeting (voor PM10, PM2,5 en ammoniak) van een biofilter nageschakeld aan een leghennenstal. In hoofdstuk vier wordt aan de hand van negen parameters een inschatting gemaakt van de effectiviteit en inzetbaarheid van het biofilter in de praktijk. In hoofdstuk vijf worden de conclusies en aanbevelingen uit deze studie weergegeven.

Conclusies

Uit dit onderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Biofiltratie is een perspectiefvolle techniek voor het verwijderen van fijnstof uit de ventilatielucht van pluimveestallen. Uit een klein aantal wetenschappelijke studies blijkt dat biofilters nageschakeld aan varkensstallen het potentieel bezitten om de concentratie van totaalstof aanzienlijk te reduceren. Uit een eenmalige, indicatieve meting van PM10 en PM2,5 aan een biofilter nageschakeld aan een leghennenstal bleek een verwijderingsrendement van respectievelijk 97 en 63%. Het verwijderingsrendement voor ammoniak bedroeg 89%. Onduidelijk is of dit rendement voor ammoniak ook op langere termijn kan worden gehandhaafd.
- Biofilters zijn toepasbaar in bestaande pluimveestallen, mits er sprake is van een centrale en geforceerde luchtafvoer en er ruimte rond de stal is om het biofilter en drukkamer te plaatsen. Het biofilter zal aanpassingen vergen aan het ventilatiesysteem (o.a. plaatsing van drukventilatoren) en de ventilatieregeling.
- De jaarkosten van biofilters zijn afhankelijk van de specifieke bedrijfssituatie, maar zijn in het algemeen lager dan die van andere end of pipe technieken, zoals een luchtwasser.
- Biofilters bevatten geen complexe regeltechniek en zijn daarom mechanisch relatief stabiel. De biologische stabiliteit van het filterpakket (verstopping door grof stof, verzuring door ophoping van producten en een onvoldoende/ongelijkmatige vochtigheid) is echter een gevoelig aspect waaraan voldoende aandacht moet worden besteed.
- Biofilters nageschakeld aan een pluimveestal kunnen worden gecombineerd met technieken en maatregelen voor fijnstofreductie die in de stal worden toegepast.
- Afwenteling vindt plaats door een hoger verbruik van elektriciteit en water en eventueel door productie van lastig te verwerken spuiwater. Verder worden arbeidsomstandigheden of de luchtkwaliteit voor de dieren in de stal niet verbeterd.
- Biofilters zijn op de markt beschikbaar en hebben een korte implementatietijd.

Aanbevelingen

- Op grond van dit onderzoek wordt aanbevolen om het verwijderingsrendement van biofilters (nageschakeld aan pluimveestallen) voor fijnstof vast te stellen d.m.v. validatiemetingen volgens een meetprotocol, zodat emissie-/reductiecijfers beschikbaar komen voor vergunningverlening.
- Verder wordt aanbevolen om in deze validatiestudie de biologische stabiliteit/werking van het biofilter te monitoren (monstername spuiwater, meten drukval, enzovoort) om meer inzicht te krijgen in de relatie tussen de biologische werking en het verwijderingsrendement van het biofilter.
- Tot slot wordt aanbevolen om in samenwerking met leveranciers van biofilters te bepalen op welke manier biofilters optimaal kunnen worden ingezet bij pluimveestallen.

Summary

To be able to comply with European standards on maximum fine dust concentrations in the ambient air, measures need to be taken in The Netherlands to reduce emissions of fine dust from major emission sources. In view of this, the Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality has commissioned Wageningen UR Livestock Research to set up a plan of action for the development of practical and effective solutions for the reduction of dust emissions from poultry facilities. Within the framework described in the plan of action, this study was carried out to evaluate the potential effectiveness and technical and economical feasibility of concepts that may be able to reduce dust emissions from poultry houses.

In the current study, the concept of biofiltration was indicatively evaluated. A biofilter is an 'end of pipe' technique in which exhaust air is led through a reactor containing organic packing material. In the organic packing material aerial pollutants like odor and ammonia are absorbed and broken down.

In chapter two a general description of the system is given including the working principle and the application of biofilters in animal husbandry. Furthermore, a literature study is carried out to determine the potential removal efficiency of biofilters for fine dust. In chapter three results are presented of indicative measurements of PM₁₀, PM_{2,5} and ammonia on a biofilter at a layer house in practice. In chapter four biofiltration is indicatively evaluated by means of eight parameters. In chapter five, conclusions and recommendations are given.

Conclusions

From this study, the following conclusions can be drawn:

- Biofiltration is a potentially effective technique for the removal of fine dust from exhaust air of poultry houses. The small number of scientific studies available on this subject indicate that biofilters have a high potential to reduce concentrations of total dust considerably. The indicative measurements on a biofilter in practice show removal efficiencies for PM₁₀ and PM_{2,5} concentrations of 97 and 63% respectively. The removal efficiency for ammonia was 89%. However, it is not clear whether the removal efficiency for ammonia will stay this high in time.
- Biofilters can be applied in already built poultry houses when a central exhaust is present and when there is enough space near the house to build a biofilter, pressure chamber, etcetera. The biofilter will probably require adjustments to the ventilation system (e.g. installing pressure fans) and ventilation control.
- Yearly costs of biofilters depend on the specific situation. In comparison to other end of pipe techniques (e.g. bio trickling filters), biofilters are relatively low in costs.
- Biofilters do not contain mechanically complex control techniques and are therefore relatively stable with regard to technical failures. However, the biological stability and functioning of the biofilter (e.g. obstruction of the filter pores through accumulation of dust particles, acidification of the filter material and an insufficient or unequally distributed water content of the filter material) needs attention.
- Biofilters that are applied in the exhaust air flow can be combined with fine dust reduction measures or techniques that are applied inside the poultry house.
- Problem swapping occurs through the higher use of electricity and water and (in some cases) production of effluent water that is difficult to process and apply. Furthermore, working conditions and air quality inside the house are not improved by biofiltration.
- Biofilters are available on the market.

Recommendations

- Based on this study, it is recommended to determine the removal efficiency of biofilters at poultry houses in practice with regard to fine dust. Measurements performed in accordance with a measurement protocol can provide emission and removal efficiency figures for legislation purposes.
- Furthermore, it is recommended to monitor the biological functioning of the biofilters in this validation study to gain insight in the relationship between biological functioning parameters and removal efficiencies.
- Finally, it is recommended to determine, e.g. in cooperation with biofilter manufacturers, in which way biofilters can be optimal applied at poultry houses.

Inhoudsopgave

Samenvatting

Summary

1	Inleiding	1
2	Algemene systeembeschrijving	2
2.1	Onderdelen en functies van het systeem.....	2
2.2	Toepassing van biofilters voor stalluchtreiniging	2
2.3	Effecten van biofiltratie op stofemissie.....	3
3	Indicatieve fijnstof- en ammoniakmeting aan een biofilter	5
3.1	Beschrijving van het leghennenbedrijf en biofilter	5
3.2	Meetstrategie en meetmethode	6
3.3	Dataverwerking	8
3.4	Resultaten en discussie	8
4	Beoordeling effectiviteit en inzetbaarheid voor de praktijk	10
5	Conclusies en aanbevelingen	12
	Literatuur	13

1 Inleiding

Om te kunnen voldoen aan de Europese norm voor fijnstofconcentraties in de buitenlucht dienen in Nederland maatregelen te worden doorgevoerd die de uitstoot van fijnstof (PM10, PM2,5) uit belangrijke bronnen terugdringen. In dit kader is door het ministerie van LNV verzocht om het uitwerken van een plan van aanpak voor het ontwikkelen van praktijkrijpe bedrijfsoplossingen voor het terugdringen van de fijnstofemissie uit de pluimveehouderij (Ogink en Aarnink, 2008). Een belangrijk uitgangspunt daarbij is dat zoveel mogelijk effectieve en praktijkrijpe maatregelen vóór juni 2011 gereed dienen te zijn.

Binnen het Plan van Aanpak worden in deelprojecten verschillende opties voor stofreductie bij pluimvee verder ontwikkeld, getest en in de praktijk gevalideerd. In het plan van aanpak zijn die opties opgenomen die in de studie van Buissonjé en Aarnink (2008) als meest perspectiefvol zijn beoordeeld. Vanuit het bedrijfsleven worden echter ook opties naar voren gebracht die perspectief zouden kunnen bieden, maar die niet in het Plan van Aanpak voorkomen. Om de potentie van deze ontwikkelingen te benutten voor de doelstellingen van het stofreductie programma is een afzonderlijk deelproject geformuleerd. Hierin wordt de naar voren gebrachte optie beschreven en wordt een eerste beoordeling uitgevoerd m.b.t. de potentiële effectiviteit en de technische en economische haalbaarheid van de optie. In dit onderzoek wordt biofiltratie beoordeeld als potentiële stofreductietechniek voor pluimveestallen.

Een biofilter is een 'end of pipe' techniek waarbij de ventilatielucht door een pakket van organisch filtermateriaal wordt gestuwd. In het filterpakket worden componenten als geur en ammoniak uit de lucht geabsorbeerd en afgebroken.

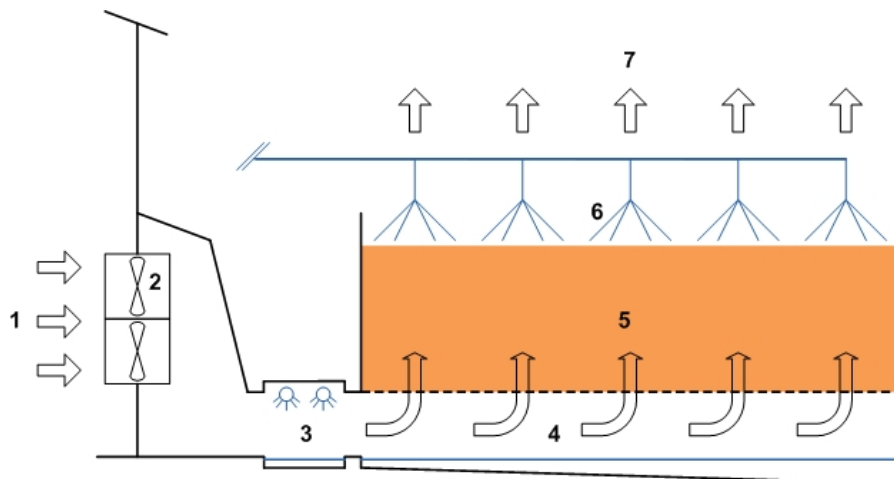
In hoofdstuk twee wordt een algemene beschrijving gegeven van het systeem, het werkingsprincipe en de toepassing van biofilters in de veehouderij. Door middel van een literatuurstudie wordt onderzocht wat het potentiële verwijderingsrendement van biofilters voor fijnstof is. In hoofdstuk drie worden de resultaten weergegeven van een indicatieve rendementsmeting van een biofilter nageschakeld aan een leghennenstal voor PM10, PM2,5 en ammoniak. In hoofdstuk vier wordt aan de hand van negen parameters een inschatting gemaakt van de effectiviteit en inzetbaarheid van het biofilter in de praktijk. In hoofdstuk vijf worden de conclusies en aanbevelingen uit deze studie weergegeven.

2 Algemene systeembeschrijving

2.1 Onderdelen en functies van het systeem

Een biofilter (biobed) is een nabehandelingstechniek ('end of pipe techniek') voor het verwijderen van verontreinigingen uit ventilatielucht. De techniek wordt binnen de veehouderij vooral toegepast voor het verwijderen van geur uit de ventilatielucht van varkensstallen. In Nederland wordt de techniek nauwelijks toegepast, in Duitsland echter wel.

Het systeem bestaat uit een bak gevuld met pakkingsmateriaal van (in tegenstelling tot biologische luchtwassers) organische oorsprong, zoals compost, boomschors, houtsnippers, heide of turf. Stallucht wordt met behulp van drukventilatoren naar een drukkamer gebracht. In de drukkamer wordt de stallucht gehomogeniseerd. Bij sommige installaties wordt de lucht daarnaast voorbevochtigd en verzadigd met waterdamp. De stallucht stroomt verder naar de onderzijde van de bak en treedt via een open (latten/rooster)bodem het filterpakket binnen. De stallucht passeert het filterpakket in opwaartse richting en verlaat het biofilter aan de bovenzijde. Het filtermateriaal zorgt voor een groot contactoppervlak dat omgeven is door een film van water en bacteriën. In het filterpakket worden de in de ventilatielucht aanwezige componenten geabsorbeerd door de waterfilm en door bacteriën omgezet/afgebroken. Boven het filterpakket is een bevochtigingsinstallatie aangebracht waarmee het organisch materiaal van de bovenzijde met water wordt bevochtigd. Het principe van biofiltratie wordt schematisch weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1 Schematische tekening van het principe van biofiltratie met de belangrijkste onderdelen: 1: ingaande (vuile) lucht, 2: ventilatoren, 3: voorbevochtiging in luchtstroom, 4: drukkamer, 5: organisch pakkingsmateriaal, 6: bevochtiging pakkingsmateriaal van boven, 7: uitgaande (schone) lucht

2.2 Toepassing van biofilters voor stalluchtreiniging

In de jaren tachtig en negentig van de vorige eeuw is in Nederland veel onderzoek verricht naar de ontwikkeling en toepassing van biofilters voor het verwijderen van geur en ammoniak uit de ventilatielucht van varkensstallen (Eggels en Scholtens, 1989; Van Asseldonk en Voermans, 1989, Donkers, 1989; Van de Sande-Schellekens en Backus, 1993; Uenk et al., 1993; Demmers en Uenk, 1996; Melse et al., 2004). Uit deze studies blijkt dat met een biofilter hoge verwijderingsrendementen voor geurcomponenten en ammoniak (ca. 70-90%) kunnen worden behaald.

Geurcomponenten in de ventilatielucht worden geabsorbeerd door de waterfilm die het pakkingsmateriaal omgeeft en vervolgens door de aanwezige bacterieflora afgebroken tot kooldioxide en water. Het kooldioxide wordt met de ventilatielucht afgevoerd. Het water komt beschikbaar voor het absorberen van geurcomponenten en ammoniak.

Het in de ventilatielucht aanwezige ammoniak wordt in vier stappen afgebroken:

1. ammoniak wordt geabsorbeerd in de waterfilm (van gas- naar waterfase);
2. een deel van het ammoniak reageert met water waarbij loog en ammonium worden gevormd ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$);
3. ammonium wordt door bacteriën (Nitrosomas spp.) omgezet in nitriet ($2 \text{NH}_4^+ + 3 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NO}_2^- + 4 \text{H}^+ + 2 \text{H}_2\text{O}$);
4. nitriet wordt door bacteriën (Nitrobacter spp.) omgezet in nitraat ($2 \text{NO}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NO}_3^-$).

Uit de hiervoor genoemde studies blijkt dat problemen kunnen ontstaan t.a.v. ophoping van gevormde (zure) producten in het filterpakket. Omdat hoge concentraties ammonium, nitriet/salpeterigzuur, nitraat/salpeterzuur, etcetera, in de waterfilm de biologische omzettingprocessen remmen, is het noodzakelijk dat de concentraties van deze producten laag blijven. Bij voor stallen gangbare luchtbelastingen (enkele honderden kuubs lucht per kubieke meter filtermateriaal) en ammoniakconcentraties zal snel verzuring van het filterpakket optreden. Dit kan worden ondervangen door:

- het filtermateriaal frequent te vervangen. Dit brengt echter kosten met zich mee;
- een groter biofilter te plaatsen. Echter; hierdoor nemen de investeringskosten per dierplaats toe
- het filtermateriaal met een bepaalde frequentie uit te spoelen met water (regeneratie van het filtermateriaal). Dit levert echter lastig te verwerken spuiwater op. Verder moet het filtermateriaal geschikt zijn om uit te spoelen.

Voor een goede biologische werking is een gelijkmatige en voldoende vochtigheid van het filtermateriaal een vereiste. Droge plekken in het filterbed zijn biologisch weinig actief en hebben een lagere luchtweerstand dan vochtige plekken. Hierdoor zal verhoudingsgewijs meer ventilatielucht door de droge plekken stromen en niet of onvoldoende worden behandeld ('kortsluitstromingen'). Te natte plekken hebben een hogere luchtweerstand waardoor verhoudingsgewijs minder ventilatielucht door deze plekken zal stromen. Het biofilter verliest voortdurend water door verdamping. Daarom is het nodig om het filterpakket te bevochtigen. Met rechtstreekse bevochtiging van het filtermateriaal is het echter moeilijk om een gelijkmatige vochtigheid te bereiken en het ontstaan van natte en droge plekken te voorkomen.

Op grond van bovenstaande twee problemen concluderen Melse en Willers (2003) dat biofiltratie voornamelijk geschikt is voor het verwijderen van geur uit stallucht die vooraf bevochtigd is en die reeds ontdaan is van ammoniak (en stof, zie volgende paragraaf). Het verwijderingsrendement voor ammoniak kan aanvankelijk hoog zijn, maar zal op langere termijn teruglopen door verzuring van het filterpakket.

Een aantal kengetallen m.b.t. de dimensionering en werking van biofilters worden weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1 Enkele algemene kengetallen van biofilters

Parameter	Waarde	Eenheid
Belasting van het filteroppervlak (bij 1 m hoogte)	≤250	m ³ /uur per m ² filteroppervlak
Belasting van het filtervolume	≤250	m ³ /uur per m ³ filtervolume
Gebuuksduur van pakkingsmateriaal	1-6	Jaren
Drukverlies over het biofilter	30-150	Pa

Bron: Arends et al. (2006)

2.3 Effecten van biofiltratie op stofemissie

Stof in de uitgaande luchtstroom wordt in het algemeen als een versturende component gezien die, wanneer het hoge concentraties betreft, vooraf uit de luchtstroom dient te worden verwijderd. Het in de ventilatielucht aanwezige stof verstopt namelijk het biofiltermateriaal. Hierdoor neemt de drukval over het biofilter toe (en daarmee de kosten voor elektriciteit), kan er onvoldoende worden geventileerd en ontstaan kortsluitstromen, voorkeursstromen of luchtkanalen in het filtermateriaal. Door het laatste neemt het contactoppervlak - en daarmee het verwijderingsrendement - af (Melse en Willers, 2003). In het algemeen wordt een afvangtechniek voor grof stof (bijv. een stoffilter, gepositioneerd tussen stal en biofilter) noodzakelijk geacht voor het goed functioneren van het

biofilter. Wanneer geen afvangtechniek voor grof stof wordt toegepast zal de frequentie van omzetten en vervangen van het filtermateriaal aanzienlijk toenemen.

Arends et al. (2006) vermelden dat slechts weinig metingen zijn verricht naar verwijderingsrendementen van biofilters voor stof. Volgens Arends et al. (2006) blijkt uit een beperkte aantal Duitse onderzoeken aan varkensstallen zonder strooisel dat de verwijderingsrendementen van biofilters voor totaalstof tussen 77 en 100% bedragen (bij ingaande massaconcentraties van totaalstof tussen 0,25 tot 1,36 mg/m³).

Seedorf en Hartung (1999) onderzochten het verwijderingsrendement van een biofilter (40 m²) nageschakeld aan een vleesvarkensstal (360 vleesvarkens) en vonden reducties van de deeltjesconcentratie van totaalstof, van 79 tot 96%. Er werden geen massaconcentraties gemeten. De auteurs merken op dat deze reducties in overeenstemming zijn met een vergelijkbare studie van Siemers en Van der Weghe (1997), waarin een reductie van de deeltjesconcentratie van totaalstof van 85% werd gevonden.

Martinec et al. (2001) onderzochten vijf verschillende organische filtermaterialen (biochips, kokosnoot/turf, boomschors, pellets/boomschors, compost) in vijf kleine biofilters (2,19 m² elk), nageschakeld aan een varkensstal. De auteurs vonden een forse reductie van de deeltjesconcentratie van stof (deeltjesgrootte 0,6 tot 20 µm) bij alle filtermaterialen. In het deeltjesgrootte traject tussen 1 en 10 µm nam het verwijderingsrendement toe met de diameter van de stofdeeltjes. Er werden geen massaconcentraties bepaald.

Tymczyna et al. (2007) onderzochten het verwijderingsrendement van een biofilter voor micro-organismen, endotoxinen en stofdeeltjes in de ventilatielucht van een kuikenbroederij voor vleeskuikens in Polen. Het biofilter mat 2,0 x 1,8 x 1,8 m (filterbeddiepte: ca. 1,3 m) en werd verdeeld in drie van elkaar gescheiden compartimenten, zodat drie filtermaterialen konden worden getest (A: 50% compost + 50% turf, B: 20% Halloysiet + 40% compost + 40% turf, C: 20% Bentoniet + 40% compost + 40% turf). De ingaande totaalstofconcentratie varieerde van 0,14 tot 4,47 (gem. 0,95) mg/m³. Alle drie filtermaterialen gaven een forse reductie van totaalstof, maar er werd geen significant verschil gevonden in stofreductie tussen de drie filtermaterialen. De gemiddelde reductie voor totaalstof bedroeg 85%.

Resumerend

Uit de in deze paragraaf beschreven studies blijkt dat biofilters potentie hebben om stofdeeltjes uit de ventilatielucht te verwijderen. Dit is aangetoond voor totaalstof/grof stof bij biofilters nageschakeld aan varkensstallen en een kuikenbroederij. Voor zover bekend zijn geen studies verricht naar het verwijderingsrendement van biofilters voor PM10 en PM2,5 stof in de ventilatielucht van pluimveestallen.

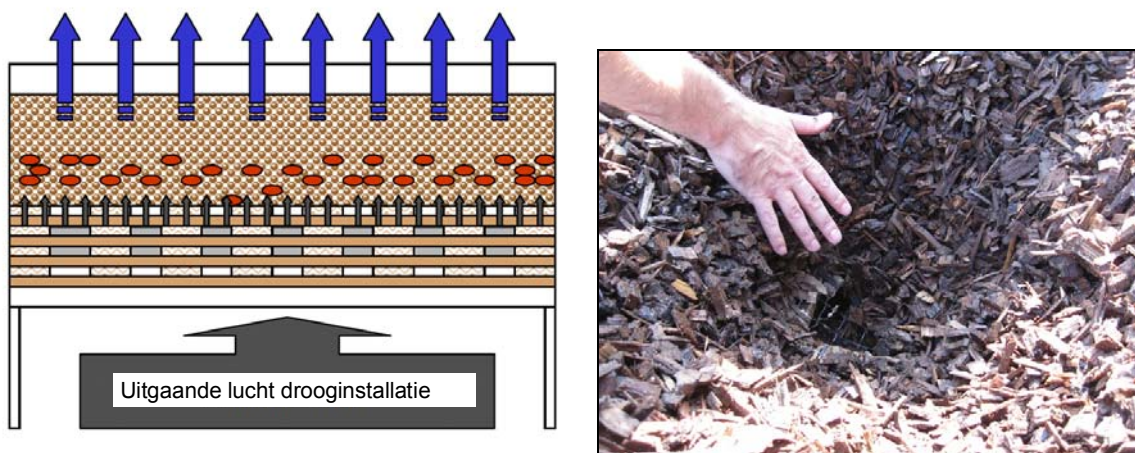
3 Indicatieve fijnstof- en ammoniakmeting aan een biofilter

3.1 Beschrijving van het leghennenbedrijf en biofilter

Op een pluimveehouderijbedrijf in de provincie Limburg is een biofilter nageschakeld aan een drooginstallatie voor pluimveemest. Het pluimveebedrijf heeft in het biofilter geïnvesteerd om de geuroverlast voor de directe omgeving te verminderen. Op het bedrijf zijn twee biofilters aanwezig, waarvan één kleine uitvoering waarop de werking (geurreductie) werd getest. Na de testfase is een tweede, groter biofilter geplaatst. Aan dit tweede biofilter zijn de in dit hoofdstuk gerapporteerde metingen uitgevoerd.

Op het bedrijf staat een stal met batterijhuisvesting voor ca. 50.000 leghennen en twee stallen met voliërhuisvesting met samen 50.000 leghennen. In totaal zijn 100.000 leghennen aanwezig. De mest wordt voorgedroogd in de stallen tot ca. 40-45% drogestof en daarna nagedroogd in een Helisysteem tot ca. 85% drogestof. Tweemaal per week worden de mestbanden uit de stal leeg gedraaid naar de drooginstallatie. Vlak voordat de nieuwe mest uit de stal bij de drooginstallatie komt wordt de gedroogde mest uit het Helisysteem gekanteld en opgeslagen in een voorraadbak onder de drooginstallatie. Iedere ochtend wordt de te drogen mest met een frees gemengd. Op het moment van kantelen van het Helisysteem en wanneer de mest vanuit de stal op de drooginstallatie wordt gebracht komt een grote hoeveelheid (zichtbaar) stof vrij. Bij de normale bedrijfsvoering wordt tijdens deze momenten de ventilatie naar het biofilter uitgezet en wordt de ruimte via open deuren geventileerd. Dit om te voorkomen dat het biofilter mogelijk dichtslibt door de grote hoeveelheid stof die ontstaat. De mest in het Helisysteem wordt gedroogd met stallucht (ca. 0,75 m³/uur per dier) en deze lucht wordt daarna door het biofilter geleid.

De metingen zijn uitgevoerd aan een biofilter van 15 m lang, 4,5 m breed en 1,60 m hoog. De hoogte bestaat uit een drukkamer van 1 m hoog en het filterbed van 0,6 m hoog. Het oppervlak van het pakkingsmateriaal bedraagt ca. 68 m², de inhoud ca. 41 m³. In Figuur 2 wordt de opbouw van het biofilter schematisch weergegeven. De lucht uit het Helisysteem wordt met ventilatoren in een drukkamer onder het biofilter gebracht. In de drukkamer zijn druksensoren aangebracht waarmee die de mate van verstopping van het biofiltermateriaal kan worden gemeten. De maximale ventilatiecapaciteit door het biofilter bedraagt ca. 75.000 m³/uur (0,75 m³/uur per dier). De lucht wordt niet voorbevochtigt. Vervolgens komt de lucht in de eerste filterlaag bestaande uit haaks op elkaar aangebrachte boomstammetjes (hoogte: ca. 35 cm). In dit houten raster zijn de doorstroomopeningen steeds kleiner naarmate de lucht verder naar boven stroomt. De laag heeft als functie het grove stof af te vangen. Op deze laag is een grofmazig gaasdoek aangebracht. Hierop ligt de tweede laag bestaande uit houtsnippers (hoogte: ca. 25 cm). De houtsnippers worden door middel van sproeiers aan de bovenzijde vochtig gehouden. De watervernevelling door de sproeiers wordt automatisch aangestuurd door sensoren die het vochtgehalte in de laag met houtsnippers meten.



Figuur 2 Links: schematische weergave van het bemeten biofilter. Rechts: de houtsnipperlaag.

Het pakkingsmateriaal van het bemeten biofilter wordt niet omgezet of vervangen. Door de leverancier wordt geadviseerd om elke 2-3 jaar houtsnippers bij te strooien. Het biofilter wordt niet op vaste momenten uitgespoeld. Wanneer het filterpakket vervuild is, kan op de besturingsmodule van het biofilter worden ingesteld dat het filterpakket moet worden uitgespoeld. Eventueel spuiwater blijft onder in de drukkamer opgeslagen en verdampt weer in de ventilatielucht. Voor het waterverbruik wordt uitgegaan van 5-7 liter per vierkante meter biofilteroppervlak per dag. Voor dit biofilter betekent dit een verwacht jaarlijks waterverbruik van ca. 125 tot 175 kuub.

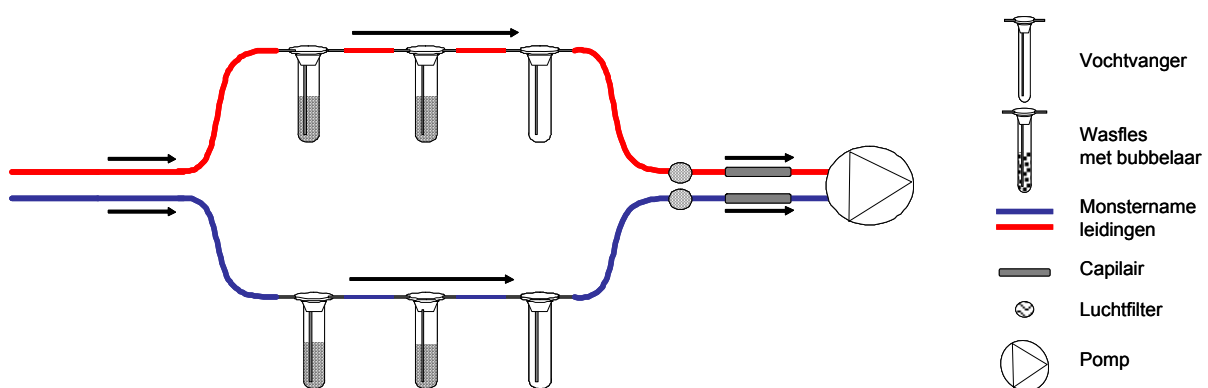
3.2 Meetstrategie en meetmethode

Om een indicatie te krijgen van het verwijderingsrendement van het beschreven biofilter voor fijnstof en ammoniak is eenmalig een 24-uursmeting uitgevoerd. Hiervoor werd de NH_3 -concentratie en de fijnstofconcentraties (PM10 en PM 2,5) van zowel de ingaande als uitgaande lucht bepaald. De ingaande lucht van het biofilter werd boven de droogunit vlak voor de ventilatoren gemeten, de uitgaande lucht werd op twee plaatsen op het biofilterbed gemeten (zie Figuur 4, linksboven). Verstoring van de meting van de uitgaande lucht door de buitenlucht werd voorkomen door de bemonstering van fijnstof en ammoniak uit te voeren in twee kokers die op het filterbed werden geplaatst (zie Figuur 4, linksboven). De meting werden op 2 en 3 november 2009 uitgevoerd. Het biofilter was op dat moment ca. drie maanden in werking. De ventilatie door het biofilter bedroeg ca. 65.000 m³/uur. De 'verblijftijd' van de lucht (eigenlijk: verblijftijd op basis van een lege ruimte; EBRT: empty bed air residence time) in het biofilter was daarmee ca. 6,0 seconden. De metingen werden gestart op de dag voordat de mest uit het Helisysteem werd gekanteld (bij droge mest, hoge stofproductie bij kantelen en mest inbrengen) en de dag erna beëindigd (bij verse mest). Dit werd gedaan om het biofilter maximaal met stof te beladen en zo de situatie te benaderen van een biofilter zonder Helisysteem, nageschakeld achter een scharrel- of voliërestal voor leghennen.

Uit eerder onderzoek is gebleken dat de fijnstofconcentratie door drooginstallaties wordt vermindert (Winkel et al., 2009). Voor de bepaling van het fijnstofrendement van het biofilter was het noodzakelijk deze vermindering zo beperkt mogelijk te houden en fijnstofconcentraties te meten die vergelijkbaar zijn met de concentraties die in pluimveestallen wordt gemeten. Voor de uitvoering van de metingen werd de ventilatie van het biofilter daarom niet uitgezet tijdens het kantelen en vullen van de drooginstallatie.

Ammoniak

De ammoniakconcentratie werd volgens de natchemische meetmethode voor NH_3 (Wintjes, 1993; zie Figuur 3) gemeten.



Figuur 3 Meetopstelling natchemisch methode voor ammoniakemissiemetingen

Bij deze meetmethode wordt de lucht via een monsternamelleiding met een constante luchtstroom (~1,0 l/min) aangezogen met behulp van een pomp en een kritische capillair die een luchtstroom geeft van ~1,0 l/min. Alle lucht wordt door een impinger (geplaatst in een wasfles met 100 ml salpeterzuur) geleid, waarbij de NH_3 wordt opgevangen. Om rekening te houden met eventuele doorslag wordt een tweede fles in serie geplaatst. Om doorslag naar de pomp te voorkomen wordt de lucht na de impingers met zuur door een vochtvanger (impinger zonder vloeistof) geleid. De metingen werden per meetplek in duplo uitgevoerd (Figuur 3). De molariteit van de zure oplossing was 0,05 M. Na de

bemonsteringstijd (24 uur) werd de concentratie gebonden NH_3 spectrofotometrisch bepaald. Voor en na de meting werd de exacte luchtstroom bepaald met behulp van een flowmeter. Door de bemonsteringsduur, de bemonsteringsflow, het NH_4^+ gehalte en de hoeveelheid opvangvloeistof te verrekenen kan de NH_3 -concentratie in de bemonsterde lucht worden bepaald.

Fijnstof (PM10 en PM2,5)

Figuur 4 laat de monstername-apparatuur zien voor PM10 en PM2,5. Gravimetrische stofmetingen van deeltjes kleiner dan $10\ \mu\text{m}$ (PM10) en van deeltjes kleiner dan $2,5\ \mu\text{m}$ (PM2,5) zijn verricht met PM10 en PM2,5 cycloon voorafsciederders en monsternamepompen (Figuur 2). Alle metingen werden in duplo uitgevoerd (2x PM10 ingaand, 2x PM10 uitgaand, 2x PM2,5 ingaand, 2x PM2,5 uitgaand). De apparatuur voor de gravimetrische meting is gebaseerd op de standaard voor bepaling van PM10 en PM2,5 concentraties in de buitenlucht (NEN-EN 12341, 1998; NEN-EN 14907, 2005). Het verschil tussen de gebruikte apparatuur en de standaard apparatuur voor de buitenlucht is dat de impactor voorafscieder is vervangen door een cycloon voorafscieder. Dit vanwege het gevaar van overbelading van de impactieplaat, vooral bij bemonstering van PM2,5 (Zhao e.a., 2009).



Figuur 4 Linksboven: meting van de uitgaande lucht in twee ventilatorkokers geplaatst op het biofilterbed. Aan een houten balk, in de kokers, hangen de monsternamekoppen voor PM10/PM2,5. Rechtsboven: de 'constant flow' monsternamepomp voor fijnstofbemonstering. Linksonder: monsternamekoppen voor PM10 en PM2,5 met (van links naar rechts): inlaat, PM10 cycloon, PM2,5 cycloon en filterhouder. Rechtsonder: de constructie van de inlaat.

PM10 en PM2,5 werd verzameld op een glasvezelfilter, nadat de grotere stofdeeltjes waren afgescheiden in de PM10 of PM2,5 cycloon (URG corp., Chapel Hill, VS). Het stof werd verzameld op glasvezelfilters met een diameter van 47 mm (type MN GF-3, Macherey-Nagel GmbH & Co., Düren, Duitsland). De filters werden voor en na de stofmonsternamen gewogen onder standaard condities: temperatuur 20 °C ± 1 °C en 50% ± 5% relatieve luchtvochtigheid. Deze voorwaarden staan beschreven in NEN-EN 14907 (2005). Het verschil in gewicht voor en na de metingen werd gebruikt om de hoeveelheid verzameld stof te bepalen. Lucht werd door inlaat, cycloon en glasvezelfilter gezogen met monsternamerpompen van het type Charlie HV (roterend, 6 m³/uur, Ravebo Supply BV, Brielle). Deze 'constant flow' pompen regelen het debiet automatisch op basis van de gemeten temperatuur bij de monsternamerekop (inlaat). Het debiet van deze pompen blijft ook constant bij toename van de drukval over het filter. Hierdoor werd een stabiele luchtstroom verkregen binnen 2% van de nominale waarde. De pompen werden geprogrammeerd op een flow van 1,0 m³/uur en op een start- en eindtijd van de monsternamperiodes. De werkelijke hoeveelheid lucht die bij de monsternamepunten werd aangezogen werd met een gasmeter gemeten (gecorrigeerd naar de temperatuur bij de monsternamepunten). Op de gemeten fijnstofconcentraties zijn de volgende correcties uitgevoerd (Hofschreuder et al., 2008; Zhao et al., 2009):

PM10: < 222,6 µg/m³: Y = 1,0877 X
 > 222,6 µg/m³: Y = 0,8304 X + 57,492
 PM2,5: geen correctie

3.3 Dataverwerking

Het verwijderingsrendement (V; in procenten) werd bepaald door het concentratieverschil tussen in- en uitgaande lucht (C_{in} - C_{uit}) te delen door de concentratie van de ingaande lucht (C_{in}) en dit te vermenigvuldigen met honderd volgens onderstaande formule:

$$V = \frac{(C_{in} - C_{uit})}{C_{in}} \times 100$$

3.4 Resultaten en discussie

In Tabel 2 worden de resultaten van de eenmalige, indicatieve meting gegeven.

Tabel 2 Concentraties van PM10, PM2,5 en NH₃ in de ingaande en uitgaande lucht van het biofilter en het berekende verwijderingsrendement

		Ingaande lucht	Uitgaande lucht	Verwijderingsrendement [%]
PM10	[mg/m ³]	1,59	0,05	97
PM2,5	[mg/m ³]	0,06	0,02	63
NH ₃	[ppm]	29,2	3,2	89

De gemeten concentraties in de uitgaande lucht waren voor alle de drie de componenten aanzienlijk lager dan de concentraties in de ingaande lucht. De berekende rendementen waren dan ook hoog (Tabel 2). Alle componenten werden in duplo gemeten. Uit de zeer kleine duplo-verschillen blijkt een grote meetnauwkeurigheid van de uitgevoerde meting. Aangezien het slechts om een eenmalige meting gaat hebben de in Tabel 2 weergegeven resultaten slechts een indicatief karakter.

De resultaten kunnen worden vergeleken met in recent onderzoek gemeten concentraties bij scharrelstallen voor leghennen (Mosquera et al., 2009), volièrestallen voor leghennen (Winkel et al., 2009a) en leghennenstallen met nageschakelde drooginstallaties (Winkel et al., 2009b; nog niet gepubliceerd).

De ingaande lucht van het bemeten biofilter was een mengsel van stallucht en lucht na droging (lucht dat door het Heli systeem was gevoerd). Bij metingen aan leghennenstallen met nageschakelde drooginstallaties werden ingaande NH₃-concentraties gemeten die tussen 7 en 56 ppm lagen. In het huidige onderzoek werd bij de eenmalige, indicatieve meting 29 ppm NH₃ gemeten. Deze waarde ligt binnen deze range.

Metingen aan droogtunnels nageschakeld aan een leghennenstal laten eveneens een aanzienlijke fijnstofreductie zien (Winkel et al, 2009b; nog niet gepubliceerd). Voor PM10 werden concentraties tussen 0,3 en 0,5 mg/m³ na de droogtunnel gemeten. Het meetresultaat van de eenmalige, indicatieve meting in het huidige onderzoek lag aanzienlijk hoger namelijk 1,59 mg/m³. Deze waarde ligt wel in de range die bij scharrel- en volièrestallen werd gemeten (Mosquera et al., 2009; Winkel et al., 2009a; 1 tot 11 mg/m³). Metingen aan droogtunnels nageschakeld aan een leghennenstal lieten ingaande PM2,5 concentraties zien tussen 0,01 en 0,1 mg/m³ (Winkel et al, 2009b; nog niet gepubliceerd). Voor PM2,5 lag het resultaat uit eerder uitgevoerde metingen bij drooginstallaties tussen 0,01 en 0,1 mg/m³. Het meetresultaat van de ingaande lucht van de eenmalige, indicatieve meting in het huidige onderzoek (0,06) ligt binnen deze range.

4 Beoordeling effectiviteit en inzetbaarheid voor de praktijk

In dit hoofdstuk wordt aan de hand van negen parameters een inschatting gemaakt van de effectiviteit en inzetbaarheid van het biofilter in de praktijk.

1. Verwijderingsrendement PM10 en PM2,5

Uit de indicatieve meting (hoofdstuk 3) blijkt een hoog verwijderingsrendement voor PM10 en PM2,5 van respectievelijk 97 en 63%.

2. Verwijderingsrendement NH₃

Uit de indicatieve meting (hoofdstuk 3) blijkt een hoog verwijderingsrendement voor NH₃ van 89%. Onduidelijk is of dit rendement ook op langere termijn kan worden gehandhaafd.

3. Verwijderingsrendement geur

Het verwijderingsrendement van biofilters voor geur is in het algemeen hoog (>70%).

4. Toepasbaarheid in bestaande stallen

Het systeem kan worden nageschakeld aan een bestaande stal. Het systeem kan echter alleen worden toegepast in stallen met een centrale luchtafvoer, zoals pluimveestallen met lengteventilatie (ventilatoren in achtergevel). Verder zullen waarschijnlijk aanpassingen moeten worden gedaan aan de ventilatie. Om de tegendruk van het biofilter te kunnen overwinnen zijn drukventilatoren nodig. Wanneer in de bestaande situatie v-snaarventilatoren worden toegepast zullen deze moeten worden vervangen door drukventilatoren. Tot slot dient er ruimte rond de stal te zijn om het biofilter (met drukkamer) te plaatsen.

5. Jaarkosten: vaste (kapitale) en variabele kosten

De jaarlijkse kosten voor een biofilter bestaan uit:

- totale investeringskosten gedeeld door de afschrijvingstermijn;
- onderhoudskosten (o.a. vervanging van het organisch pakkingsmateriaal, stoffilters, etc.);
- kosten voor extra arbeid die nodig is voor het omzetten het filtermateriaal, het verwijderen van onkruid, het verhelpen van storingen, het controleren van de werking van het filter, enzovoort;
- kosten voor waterverbruik (bevochtiging) en extra energie (elektriciteit) die nodig is om de ventilatielucht door het filterbed te stuwen;
- eventuele kosten voor opslag en afvoer van spuiwater.

De totale jaarlijkse kosten zullen sterk afhankelijk zijn van de specifieke bedrijfssituatie en van de dimensionering en uitvoering van het biofilter. De investeringskosten en operationele kosten worden echter als relatief laag beoordeeld in verhouding tot andere end of pipe technieken, zoals biologische luchtwassers of chemische luchtwassers.

6. Mechanische stabiliteit

Het systeem bevat geen draaiende delen of complexe regeltechniek. Bevochtiging van het filtermateriaal wordt geregeld d.m.v. vochtvoelers of een tijdschakelaar. Het is echter onduidelijk of een dergelijk bevochtigingssysteem adequaat genoeg is om droge/natte plekken te voorkomen en een goede vochtigheid van het filtermateriaal te verkrijgen. Een belangrijk aandachtspunt is het voorkomen van verzuring (dit kan het beton aantasten) en ophoping van afbraakproducten in het filterpakket (met als gevolg een afnemende ammoniakverwijdering). Dit kan worden gerealiseerd door het tijdig vervangen van het filtermateriaal en eventueel door het doorspoelen van het filter. Daarnaast dient aandacht te worden besteed aan het vermijden van kanaalvorming.

7. Combinatie met fijnstofreducerende technieken

Omdat het biofilter wordt nageschakeld aan het stalsysteem is een combinatie mogelijk met stofreducerende technieken en maatregelen die in de stal worden uitgevoerd, zoals ionisatie van stallucht en het aanbrengen van een oliefilm op strooisel.

8. Afwenteling

Er zijn vijf aandachtspunten m.b.t. afwenteling:

1. Om de stallucht door het biofilter te bewegen moet met drukventilatoren luchtdruk worden opgebouwd in een drukkamer. Dit leidt tot een hoger verbruik van elektriciteit en de daarmee gepaard gaande CO₂-productie.

2. Bevochtiging van het filtermateriaal leidt tot een toename van het waterverbruik.
3. Voor een goede biologische werking en ammoniakverwijdering is het belangrijk om het biofiltermateriaal voldoende vochtig te houden. Wanneer verdamping en bevochtiging in evenwicht kunnen worden gehouden zal er weinig spuiwater worden geproduceerd. Wanneer het filterbed regelmatig moet worden uitgespoeld om verzuring tegen te gaan, zal een lastig te verwerken spuiwater worden geproduceerd.
4. Het systeem is een 'end of pipe' techniek. Dit betekent dat de arbeidsomstandigheden en de luchtkwaliteit voor de dieren niet worden verbeterd.
5. Mogelijk wordt er lachgas (N₂O) gevormd in het biofilter.

9. Implementatietijd

Het systeem is op de markt beschikbaar.

In Tabel 3 wordt een indicatieve beoordeling gegeven van alle bovenstaande parameters.

Tabel 3 Beoordeling van biofilters als potentiële stofreductietechniek

Beoordeelde parameter	Score
1. Verwijderingsrendement PM10 en PM2,5	++
2. Verwijderingsrendement NH ₃	-/+ (*)
3. Geurverwijdering	++
4. Toepasbaarheid in bestaande stallen	+
5. Jaarkosten: vaste (kapitale) en variabele kosten	-/+
6. Mechanische stabiliteit	-/+
7. Combinatie met fijnstofreducerende technieken	+
8. Afwenteling	-/+
9. Implementatietijd	+

Score: --, -, -/+, + en ++

(*) Er bestaan twijfels over de ammoniakverwijdering op de lange termijn

5 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

Uit dit onderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Biofiltratie is een perspectiefvolle techniek voor het verwijderen van fijnstof uit de ventilatielucht van pluimveestallen. Uit een klein aantal wetenschappelijke studies blijkt dat biofilters nageschakeld aan varkensstallen het potentieel bezitten om de concentratie van totaalstof aanzienlijk te reduceren. Uit een eenmalige, indicatieve meting van PM10 en PM2,5 aan een biofilter nageschakeld aan een leghennenstal bleek een verwijderingsrendement van respectievelijk 97 en 63%. Het verwijderingsrendement voor ammoniak bedroeg 89%. Onduidelijk is of dit rendement voor ammoniak ook op langere termijn kan worden gehandhaafd.
- Biofilters zijn toepasbaar in bestaande pluimveestallen, mits er sprake is van een centrale en geforceerde luchtafvoer en er ruimte rond de stal is om het biofilter en drukkamer te plaatsen. Het biofilter zal aanpassingen vergen aan het ventilatiesysteem (o.a. plaatsing van drukventilatoren) en de ventilatieregeling.
- De jaarkosten van biofilters zijn afhankelijk van de specifieke bedrijfssituatie, maar zijn in het algemeen lager dan die van andere end of pipe technieken, zoals een luchtwasser.
- Biofilters bevatten geen complexe regeltechniek en zijn daarom mechanisch relatief stabiel. De biologische stabiliteit van het filterpakket (verstopping door grof stof, verzuring door ophoping van producten en een onvoldoende/ongelijkmatige vochtigheid) is echter een gevoelig aspect waaraan voldoende aandacht moet worden besteed.
- Biofilters nageschakeld aan een pluimveestal kunnen worden gecombineerd met technieken en maatregelen voor fijnstofreductie die in de stal worden toegepast.
- Afwenteling vindt plaats door een hoger verbruik van elektriciteit en water en eventueel door productie van lastig te verwerken spuiwater. Verder worden arbeidsomstandigheden of de luchtkwaliteit voor de dieren in de stal niet verbeterd.
- Biofilters zijn op de markt beschikbaar en hebben een korte implementatietijd.

Aanbevelingen

- Op grond van dit onderzoek wordt aanbevolen om het verwijderingsrendement van biofilters (nageschakeld aan pluimveestallen) voor fijnstof vast te stellen d.m.v. validatiemetingen volgens een meetprotocol, zodat emissie-/reductiecijfers beschikbaar komen voor vergunningverlening.
- Verder wordt aanbevolen om in deze validatiestudie de biologische stabiliteit/werking van het biofilter te monitoren (monsternamen spuiwater, meten drukval, enzovoort) om meer inzicht te krijgen in de relatie tussen de biologische werking en het verwijderingsrendement van het biofilter.
- Tot slot wordt aanbevolen om in samenwerking met leveranciers van biofilters te bepalen op welke manier biofilters optimaal kunnen worden ingezet bij pluimveestallen.

Literatuur

- Arends, F., G. Franke, E. Grimm, W. Gramatte, S. Häuser, J. Hahne. 2006. Abluftreinigung für Tierhaltungsanlagen. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), Darmstadt, Deutschland. KTBL-Schrift 451.
- Demmers, T.G.M. en G.H. Uenk. 1996. Experimenten met een biofilter op kleine schaal. IMAG-DLO. Nota P 96-37.
- Donkers, H.A.J. 1986. Biofiltratie van ammoniak bevattende afgassen. Afstudeerverslag Technische Hogeschool Eindhoven, afdeling Scheikundige Technologie.
- Eggels, P.G. en R. Scholtens. 1989. Biofiltratie van ammoniak bevattende stallucht bij de intensieve veehouderij. Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen (IMAG) en Hoofdgroep Maatschappelijke Technologie TNO (MT-TNO). Rapport 89-107.
- Hofschreuder, P., Y. Zhao, A.J.A. Aarnink and N.W.M. Ogink. 2008. Measurement protocol for emissions of fine dust from animal housings. Considerations, draft protocol and validation. Report 134, Animal Sciences Group, Lelystad.
- Martinec, M., E. Hartung, T. Jungbluth, F. Schneider, P.H. Wieser. 2001. Reduction of gas, odor and dust emissions from swine operations with biofilters. Paper for the ASAE Annual International Meeting, Sacramento, California, USA. July 30 – August 1, 2001. Paper number 014079.
- Melse, R.W. 2004. Biologisch filter voor verwijdering van methaan uit lucht van stallen en mestopslagen. Agrotechnology and Food Innovations B.V. Rapport 2003-16.
- Melse, R.W. en H.C. Willers. 2004. Toepassing van luchtbehandelingstechnieken binnen de intensieve veehouderij. Fase 1: Techniek en kosten. Agrotechnology and Food Innovations B.V., Wageningen. Rapport 029.
- Mosquera, J., A. Winkel, F. Dousma, E. Lovink, N.W.M. Ogink en A.J.A. Aarnink. 2009. Fijnstofemissie uit stallen: leghennen in scharrelhuisvesting. Wageningen UR Livestock Research. Rapport 279.
- Ogink, N. en A.J.A. Aarnink. 2009. Plan van aanpak bedrijfsoplossingen voor fijnstofreductie in de pluimveehouderij. Rapport 113, Animal Sciences Group, Wageningen UR.
- Uenk, G.H., G.J. Monteny, T.G.M. Demmers, M.G. Hissink. Vermindering ammoniakemissie door gebruik biofilters. PROPRO-project luchtzuivering vleesvarkensstallen. IMAG-DLO. Rapport 93-28.
- Seedorf, J and J. Hartung. 1999. Untersuchungen zum Rückhaltevermögens eines Biofilters und eines Biowäschers für Bioaerosole an zwei Schweineställen. Berl. Münch. Tierärztl. Wschr. 112:444-447.
- Tymczynna, L., A. Chmielowiec-Korzeniowska, A. Drabik. 2007. The effectiveness of various biofiltration substrates in removing bacteria, endotoxins and dust from ventilation system exhaust from a chicken hatchery. Poultry Science 86:2095-2100.
- Van Asseldonk, M.M.L. en J.A.M. Voermans. 1989. Toepassing van biobedden in de varkenshouderij. Proefstation voor de Varkenshouderij. Proefverslag nummer 1.47.
- Van de Sande-Schellekens, A.L.P. en G.B.C. Backus. 1993. Ervaringen met biobedden op vleesvarkensbedrijven in PROPRO. Proefstation voor de Varkenshouderij. Proefverslag nummer P 1.99.
- Winkel, A., J. Mosquera, J.M.G. Hol, G.M. Nijeboer, N.W.M. Ogink en A.J.A. Aarnink. 2009a. Fijnstofemissie uit stallen: leghennen in volièrehuisvesting. Wageningen UR Livestock Research. Rapport 278.
- Winkel, A., J. Mosquera, H.H. Ellen, J.M.G. Hol, G.M. Nijeboer, N.W.M. Ogink en A.J.A. Aarnink. 2009b. Fijnstofemissie uit stallen: leghennen in stallen met een droogtunnel. Wageningen UR Livestock Research. Rapport 280. Nog niet gepubliceerd, in concept.
- Wintjens, Y. 1993. Gaswasfles. In: Meetmethoden NH₃-emissie uit stallen. Onderzoek inzake de mest en ammoniakproblematiek in de veehouderij 16 (eds. E.N.J. van Ouwkerk), pp. 38-40. DLO, Wageningen.
- Zhao, Y., A.J.A. Aarnink, P. Hofschreuder, and P.W.G. Groot Koerkamp. 2009. Validation of cyclone as a pre-separator for airborne dust sampling in animal houses. Aerosol Science 40(10):868-878.



Wageningen UR Livestock Research

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

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