

Animal Sciences Group

Kennispartner voor de toekomst



process for progress

Rapport 158

Maatregelen ter vermindering van fijnstofemissie uit pluimveehouderij: inventarisatie waterwasm-systemen

September 2008



ANIMAL SCIENCES GROUP
WAGENINGEN UR

Colofon

Uitgever

Animal Sciences Group van Wageningen UR
Postbus 65, 8200 AB Lelystad
Telefoon 0320 - 238238
Fax 0320 - 238050
E-mail Info.veehouderij.ASG@wur.nl
Internet <http://www.asg.wur.nl>

Redactie

Communication Services

Aansprakelijkheid

Animal Sciences Group aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Liability

Animal Sciences Group does not accept any liability for damages, if any, arising from the use of the results of this study or the application of the recommendations.

Losse nummers zijn te verkrijgen via de website.



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

Abstract

Report on the full scale solutions available for the removal of particulate matter from poultry housing by the application of water washers

Keywords: particle matter emission reduction, water washers, ventilation air, animal production

Referaat

ISSN 1570 - 8616

Auteurs: D.A.J. Starmans, N.W.M. Ogink, C.M. Groenestein

Titel: Maatregelen ter vermindering van fijnstofemissie uit pluimveehouderij: inventarisatie waterwas-systemen
Rapport 158

Samenvatting

Rapportage over praktijkoplossingen die beschikbaar zijn voor verwijdering van fijnstof uit de pluimveehouderij door toepassing van waterwassers

Trefwoorden: stofreductie, waterwassers, ventilatielucht, veehouderij



Rapport 158

Maatregelen ter vermindering van fijnstofemissie uit pluimveehouderij: inventarisatie waterwas-systemen

Measures to reduce fine-dust emissions from poultry housing: inventarisation water-scrubbing systems

D.A.J. Starmans
N.W.M. Ogink
C.M. Groenestein

September 2008

Samenvatting

Het doel van deze studie is in beeld te brengen welke potentiële praktijkoplossingen beschikbaar zijn voor fijnstofverwijdering in de pluimveehouderij gebaseerd op de toepassing van waterwassers. Daarbij wordt toegelicht welke onderliggende scheidingsmechanismen van belang zijn en vervolgens wordt geïnventariseerd welke systemen beschikbaar zijn om op korte termijn in de praktijk te kunnen worden ingezet. De wassystemen worden beschreven en de verwachte inzetbaarheid en effectiviteit in de praktijk beoordeeld aan de hand van een zevental parameters.

De studie brengt eerst in beeld welke scheidingsmechanismen van belang zijn bij de inzet van waterwassers. Het belangrijkste scheidingsmechanisme is gekoppeld aan *inertiedepositie*. Op basis van fysieke kennis over het gedrag tussen deeltjes en water, is de theoretische *invangefficiëntie* berekend.

In totaal worden vier wassystemen beschreven:

Systeem 1: waterbak en watergordijn

Systeem 2: door waterbak roterende filterwand

Systeem 3: sproeiers gecombineerd met wand voor afvang stof en waterdruppels

Systeem 4: waterwasser met gepakt bed

Op grond van een zevental parameters zijn de systemen vervolgens beoordeeld. Er is beoordeeld op verwijderingrendement fijnstof, mechanische stabiliteit van het systeem, reinigbaarheid van het systeem, jaarkosten, toepasbaarheid, afwenteling naar andere compartimenten en implementatietijd.

In zijn algemeenheid kan geconcludeerd worden dat alle beschreven systemen in principe geschikt lijken om als nageschakelde techniek fijnstof te verwijderen uit pluimveestallen. De praktijk moet echter nog uitwijzen in welke mate PM10 en PM2.5 uit de stallucht verwijderd kan worden. Het algemene beeld na het kwalitatief toepassen van de 7 parameters is dat systeem 4 het meest positief lijkt, systeem 3 wordt iets gunstiger beoordeeld dan systeem 1, terwijl de verwachtingen van systeem 2 het laagst zijn.

Wanneer specifiek wordt gekeken naar de drie belangrijkste parameters inpasbaarheid, implementatietijd en effectiviteit (uitgedrukt in verwijderingrendement en jaarkosten) dan kan het volgende worden geconcludeerd:

- Inpasbaarheid: alle systemen kunnen als nageschakelde techniek ingezet worden in stalrichtingen met *lengteventilatie* of in combinatie met een bestaande nageschakelde techniek. Het lijkt erop dat de meeste systemen grove stofdeeltjes (groter dan PM10) afvangen, hetgeen inhoudt dat dit zou kunnen helpen om het probleem van verstopping van huidige luchtwassers te verhelpen.
- Implementatietijd: de verwachting is dat voor systeem 2 nog een langdurig ontwikkelingstraject nodig is van minimaal een jaar. Systeem 1 kent een relatief eenvoudige opzet waardoor dat binnen een tijdstraject van 3-6 maanden gerealiseerd kan worden. Met het wandonderdeel van systeem 3 is al ervaring opgedaan, ook hier kan naar verwachting over een traject van 3-6 maanden een werkend systeem worden gerealiseerd. Systeem 4 is al operationeel in de praktijk.
- Effectiviteit: Gezien de benodigde expertise voor het realiseren en operationaliseren van de vier systemen, ligt het voor de hand om elk van de vier gegeven wasserconcepten zo te optimaliseren dat de meest gunstige verhouding (kg fijnstof/€) wordt bereikt. Het verwijderingspercentage zal naar verwachting het hoogst liggen voor systeem 4, gevolgd door 3, 2 en 1. Gegevens ontbreken om benaderend in te schatten hoe bij deze verwijderingspercentages de daadwerkelijke verhouding (kg fijnstof/€) voor elk van de installaties ligt. Wanneer echter uitgegaan wordt van de wenselijkheid dat een zeker minimaal verwijderingsniveau dient te worden bereikt (stel minimaal 30% fijnstof) dan zullen systemen 4 en 3 het eerst in aanmerking komen als meest effectief.

In de pluimveehouderij bestaat de behoefte op korte termijn te kunnen beschikken over technieken voor fijnstofverwijdering. Voor elke bedrijfssituatie zal een op maat gesneden oplossing gevonden dienen te worden waarbij rekening wordt gehouden met de grootte van het bedrijf, de heersende achtergrondconcentratie en de afstand van het bedrijf tot het publieke terrein. Waterwassers kunnen hierin een rol spelen. Op grond van verwachte effectiviteit en snelle beschikbaarheid kan het best geïnvesteerd worden in de verdere optimalisatie en validatie van de systemen 4 en 3. Systeem 1 kan interessant zijn voor bedrijfstoepassingen waar beperkte verwijderingspercentages (<20 - 30%) volstaan. Systeem 2 vraagt een lange ontwikkelingstijd waardoor deze niet op korte termijn in de praktijk kan worden geïmplementeerd.

Summary

The purpose of this study was to picture which potential practical solutions are available for the removal of particulate matter in the poultry sector based on the application of water washers. It highlights which underlying separation mechanisms are important and subsequently it is surveyed which systems are available for use in practice in the short term. The washing systems are described and the expected usability and effectiveness in practice are judged on the basis of seven parameters.

The study first describes which separation mechanisms are important in using the water washers. The most important separation mechanism is linked to *inertion deposition*. On the basis of physical knowledge about the behaviour between particles and water, the theoretical *collection efficiency* has been calculated.

In total four washing systems are described:

System 1: water reservoir and water curtain

System 2: through water reservoir rotating filter wall

System 3: sprinklers combined with wall for catching particulates and water drops

System 4: water washer with packed bed filters

The systems were assessed on the basis of seven parameters. The assessment involved removal efficiency of particulate matter, mechanic stability of the system, cleanability, yearly costs, applicability, shifting to other compartments and implementation time.

In general it can be concluded that all systems described seem to be fit as end-of-pipe techniques to remove particulate matter from poultry barns. Practice has to prove, however, to what extent PM10 and PM2.5 can be removed from the barn air. The general picture, after qualitatively applying the seven parameters, is that system 4 seems the most positive one, system 3 is considered somewhat more favourable than system 1. System 2 shows to be the least promising.

When the three most important parameters are considered specifically, i.e., suitability, implementation time and effectiveness (expressed in removal efficiency and yearly costs), the following can be concluded:

- Suitability: all systems can be used as end-of-pipe techniques in barn designs with *longitudinal ventilation* or in combination with an existing end-of-pipe technique. It seems that most systems catch coarse particulates (> PM10), which means that this could help to solve the problem of blockage of the current air washers.
- Implementation time: it is expected that system 2 still needs a long developmental stage of at least one year. System 1 is relatively simple and can be implemented within 3-6 months. Experience has already been gained with the wall component of system 3. Also this system can be implemented within 3-6 months. System 4 is already operational in practice.
- Effectiveness: in view of the necessary expertise for realising and making the four systems operational, it is obvious to optimise each of the four given washer concepts such that the most favourable ratio (kg of particulate matter/€) is attained. The removal percentage is expected to be the highest for system 4, followed by 3, 2, and 1. Data are lacking to estimate what the actual ratio (kg of particulate matter/€) for each of the installations is with these removal percentages. If we assume the desirability that a certain minimal removal level is to be attained (suppose at least 30% of particulate matter), systems 4 and 3 will be considered the most effective.

In the poultry sector there is an urgent need to have techniques for removing particulate matter. For each farm situation a solution should be tailor-made, where account is taken of the size of the farm, the actual background concentration and the distance from the farm to the public area. Water washers can play a role here. On the basis of expected effectiveness and rapid availability the best investment will be in further optimising and validating systems 4 and 3. System 1 may be interesting for application on farms where limited removal percentages are sufficient (<20-30%). System 2 needs a long developmental stage, due to which this one cannot be implemented in the short term.

Inhoudsopgave

Samenvatting

Summary

1 Inleiding	1
2 Theoretische achtergrond	2
2.1 Inertiedepositie	2
2.2 Stroomlijndepositie	3
2.3 Diffusiedepositie (Brownse beweging)	4
2.4 Gravitatiedepositie	4
2.5 Elektrostatische depositie	5
2.6 Interactie tussen stof en een wateroppervlak	5
3 Systeembeschrijvingen	7
3.1 Algemeen	7
3.2 Systeem 1	7
3.3 Systeem 2	8
3.4 Systeem 3	9
3.5 Systeem 4	10
3.6 Interactie tussen stof en waterdruppels: Theoretische uitwerking	12
4 Beoordeling effectiviteit en inzetbaarheid voor de praktijk	13
4.1 Parameters voor beoordeling effectiviteit en inzetbaarheid van wassers voor stofverwijdering	13
4.2 Kwalitatieve beoordeling	14
5 Discussie	17
5.1 Vergelijking van systemen onderling	17
5.2 Toepassingen met een alternatieve wasvloeistof	17
5.3 Gezondheidsrisico's van het gebruik van water als reinigingsvloeistof	18
6 Conclusies	19
7 Aanbevelingen	20
Begrippenlijst	21
Literatuur	22

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 uit belangrijke bronnen terugdringen.

De door de EU richtlijnen 1999/30/EC en 96/62/EC gegeven limieten voor PM10 zijn weergegeven in tabel 1.

Tabel 1 EU limieten voor PM10

	Vanaf 1 januari 2005
Jaarlijks gemiddelde	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Daggemiddelde (24-uur)	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Toegestaan aantal overschrijdingen per jaar	35

In dit kader is door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit verzocht om het uitwerken van een plan van aanpak voor het praktijkklaar maken en testen van beschikbare bedrijfsoplossingen om de fijnstof emissie uit de pluimveehouderij te reduceren. Een belangrijk uitgangspunt daarbij is dat zoveel mogelijk effectieve en praktijkrijpe maatregelen vóór 2010 gereed dienen te zijn. Binnen het plan van aanpak worden langs meerdere lijnen oplossingsrichtingen met verschillende werkingsprincipes uitgewerkt. Het doel van deze studie is potentiële praktijkoplossingen gebaseerd op de toepassing van *waterwassers* in beeld te brengen. Daarbij wordt geïnventariseerd welke systemen beschikbaar zijn om op korte termijn in praktijk te kunnen worden ingezet, wordt een beschrijving van de wassystemen gegeven, en wordt de waarschijnlijke *inzetbaarheid* en *effectiviteit* in de praktijk beoordeeld aan de hand van zeven parameters.

Er zijn een aantal manieren bekend om stof uit lucht te halen. In dit project wordt gekeken naar systemen die gebruik maken van water. Door het invangen van stofdeeltjes door waterdruppels en depositie van stofdeeltjes op het bevochtigde oppervlak van een pakkingmateriaal kan een deel van de stofdeeltjes uit de aangevoerde stallucht worden verwijderd. Uit onderzoek met luchtwassers voor de reductie van ammoniak uit stallucht bleek dat luchtwassers ook een functie kunnen hebben bij de verwijdering van vaste deeltjes uit de te behandelen lucht. Echter, omdat luchtwassers zijn gedimensioneerd op hun effectiviteit voor de verwijdering van ammoniak, zijn er nog slagen te maken in de ontwikkeling en optimalisering van systemen die specifiek zijn toegerust op de verwijdering van stof.

Oplossingen voor het stofprobleem van individuele bedrijven is maatwerk. De lokale bedrijfssituatie is van groot belang of uiteindelijk aan de gestelde normen voldaan kan worden bij gebruik van een bepaald type stofreductiesysteem. Hierbij is het rendement van het systeem een belangrijke factor is, maar ook de voorgenomen bedrijfsomvang en de reeds aanwezige achtergrondconcentratie stof.

In dit rapport wordt een aantal theoretische aspecten van stofverwijdering besproken, naast uit de industrie bekende algemene randvoorwaarden voor het invangen van stof. Er worden vervolgens vier systemen voor stofverwijdering beschreven die potentie hebben voor een toepassing in de praktijk. Deze systemen worden beoordeeld op basis van operationele factoren en ervaringskennis van luchtwassers, met betrekking tot hun inzetbaarheid en effectiviteit in de praktijk. Het rapport wordt afgesloten met conclusies waarbij wordt aangegeven welke systemen het meest perspectiefvol lijken voor bredere praktijktoepassing.

2 Theoretische achtergrond

Het basismechanisme voor het verzamelen van stof door een apparaat bestaat uit een aantal stappen:

- Afscheiding van de deeltjes van de gasstroom door depositie op een verzameloppervlak
- Het vasthouden van deze deeltjes door het verzameloppervlak (retentie)
- Verwijdering van de deeltjes van het verzameloppervlak

De in de literatuur gegeven mechanismen¹ waarmee deeltjes uit lucht afgescheiden kunnen worden zijn:

- Inertiedepositie (weerstand om van baanprojectie te veranderen, "rechtuit doorvliegen")
- Stroomlijndepositie
- Diffusiedepositie
- Gravitatie depositie
- Elektrostatische depositie

Voor het specifieke geval van waterwassers voor het verwijderen van deeltjes uit een luchtstroom kunnen in volgorde van belangrijkheid inertiedepositie en stroomlijndepositie worden genoemd. Voor zeer grote deeltjes ($>>10 \mu\text{m}$) speelt gravitatiedepositie en voor zeer kleine deeltjes diffusiedepositie eveneens een rol. De hoofdmechanismen worden hieronder nader toegelicht.

2.1 Inertiedepositie

Als een deeltje wordt meegevoerd door een luchtstroom, en deze buigt af doordat de lucht een obstakel (vezel, waterdruppel, etc.) tegenkomt, dan zal het deeltje niet exact de luchtbeweging volgen, maar als gevolg van zijn massa (inertia) een licht afwijkende, meer rechtdoor gerichte baan volgen. De mate van deeltjesafscheiding wordt gekenmerkt door scheidingsgetal N_{si} (-) in de volgende formule:

$$N_{SI} = \frac{K_m \rho_p D_p^2 v_0}{18 \mu D_b} \quad [1]$$

Met	N_{SI}	=	het scheidingsgetal door inertiedepositie
	K_m	=	de Stokes-Cunningham correctiefactor (-)
	ρ_p	=	de dichtheid van de deeltjes (kg/m^3)
	D_p	=	de diameter van het deeltje (m)
	v_0	=	de gassnelheid (m/s)
	μ	=	de viscositeit van het gas (Pa·s)
	D_b	=	de diameter van de invangende waterdruppel (m)

De waarde van K_m is een correctie voor de mate van luchtweerstand, welke afhankelijk is van het Reynoldsgetal ($Re = v_0 \cdot D_p / \mu$). Het Reynoldsgetal wordt gebruikt om te duiden of een stroom laminair of turbulent is. Bij laminaire stroming ($10^{-4} < Re < 0,2$) ligt K_m tussen 1,002 en 1,04. Bij de overgang naar turbulente stroming ($0,2 < Re < 1000$) ligt K_m tussen 1 en 18. In het turbulente gebied neemt K_m ongeveer evenredig toe met het Reynoldsgetal.

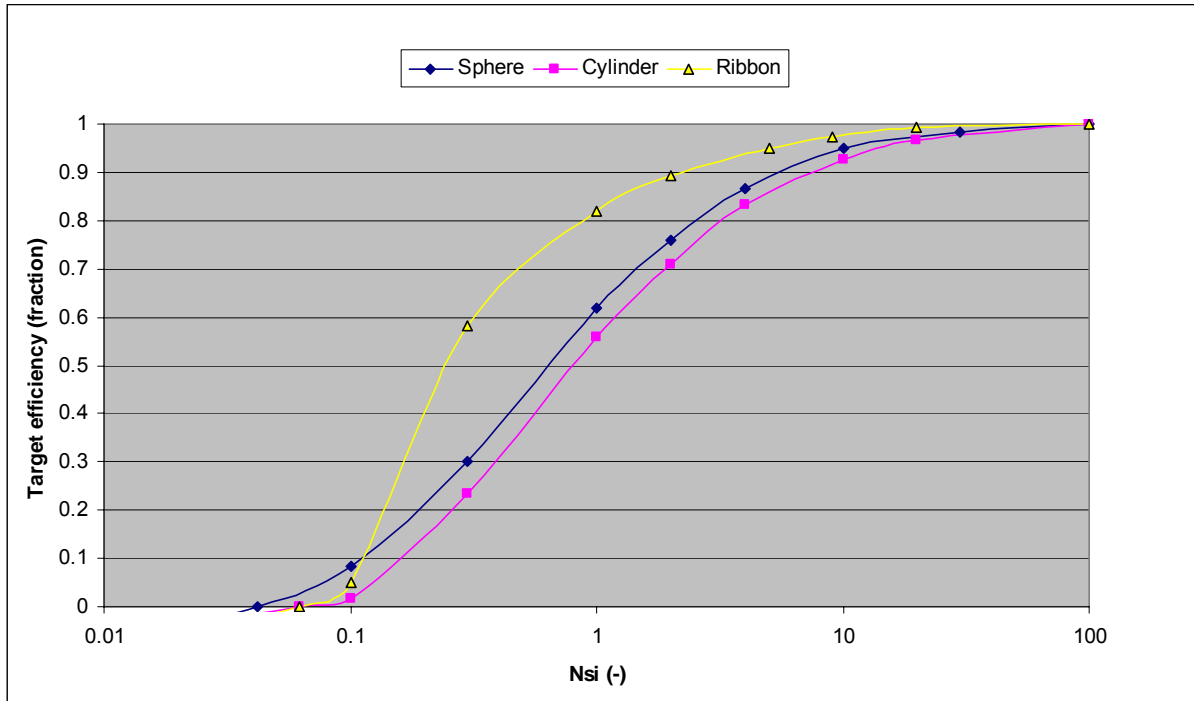
Uit de formule 1 kan worden afgeleid dat voor een effectieve inertiedepositie het van belang is dat

- de luchtstroom turbulent is
- er veel deeltjes per m^3 lucht aanwezig zijn
- de stofdeeltjes groot zijn
- de snelheid van de lucht door de wasser hoog is
- de diameter van de waterdruppel klein is.

De relatie tussen het scheidingsgetal en de invangefficiëntie per ontmoeting tussen aanvliegend deeltje en druppeldeeltje wordt weergegeven door figuur 1. Hieruit valt op te maken dat voor de sferische (bolvormige) stofdeeltjes geldt dat voor een invangefficiëntie van 90% van de deeltjes, N_{si} minimaal de waarde 5 dient te hebben. Voor 95% invangefficiëntie is een minimale waarde van 10 vereist. Met invangefficiëntie op deeltjesniveau wordt de fractie bedoeld van het aanstroomoppervlak geprojecteerd op het invangende deeltjesoppervlak, waarbinnen alle stofdeeltjes het invangende druppeldeeltje raken door inertia. Voor de uiteindelijke totale verwijderingsefficiëntie in een wassysteem is deze invangefficiëntie op eenmalig ontmoetingsniveau van belang.

Voor het totale rendement op systeemniveau speelt uiteraard de kans dat gedurende de verblijftijd in het systeem de aanvloeiende deeltjes in de baan van invangende waterdruppels komen een cruciale rol.

Figuur 1 Invangefficiëntie als functie van N_{si} voor invangende deeltjes van verschillende geometrie²



2.2 Stroomlijndepositie

Als een stroomlijn een invingend (water)deeltje passeert binnen de straal van het met de stroomlijn meegevoerde deeltje, dan zal dit deeltje botsen met het invangende waterdeeltje. Hiervoor is geen inertie of diffusie nodig. De mate van deeltjesafscheiding wordt gekenmerkt door scheidingsgetal N_{SF} (-) in de volgende formule:

$$N_{SF} = \frac{D_p}{D_b} \quad [2]$$

Met N_{SF} = scheidingsgetal door stroomlijndepositie
 D_p = de diameter van het meegevoerde deeltje (m)
 D_b = de diameter van de invangende waterdruppel (m)

Uit de formule kan dus worden afgeleid dat voor een efficiënte stroomlijndepositie het van belang is dat:

- de stofdeeltjes groot zijn
- de waterdruppels klein zijn

Een watergordijn met zeer kleine waterdruppels garandeert niet dat kleine stofdeeltjes kunnen worden afgevangen. Dit komt omdat een watergordijn van zeer kleine druppels moeilijk als zodanig in stand te houden is.

2.3 Diffusiedepositie (Brownse beweging)

Kleine deeltjes (met name deeltjes kleiner dan $0,3 \mu\text{m}$) vertonen diffusie als gevolg van de Brownse beweging. Hierdoor bewegen deze deeltjes niet uniform langs stroomlijnen van een gasstroom. Deze deeltjes bewegen naar het invangende deeltje toe. De mate van deeltjesafscheiding wordt gekenmerkt door scheidingsgetal N_{sd} (-) in de volgende formule:

$$N_{SD} = \frac{D_v}{v_0 D_b} \quad [3]$$

met D_v = de diffusiecoëfficiënt van het deeltje (m^2/s)
 v_0 = de gassnelheid (m/s)
 D_b = de diameter van de invangende waterdruppel (m)

Uit formule 3 kan worden afgeleid dat voor een efficiënte diffusiedepositie het van belang is dat:

- de stofdeeltjes klein zijn (hoge diffusiecoëfficiënt)
- de gassnelheid laag is (weinig inertiedepositie)
- de waterdruppels klein zijn

De voorwaarde van een lage gassnelheid houdt in dat het aandeel van diffusiedepositie op de totale depositie in een in de praktijk geplaatste waterwaster laag zal zijn.

2.4 Gravitatiedepositie

Als gevolg van de zwaartekracht zullen grote deeltjes van nature een versnelling naar het aardoppervlak ondervinden. De mate van deeltjesafscheiding wordt gekenmerkt door scheidingsgetal N_{sg} (-) in de volgende formule:

$$N_{SG} = \frac{u_t}{v_0} \quad [4]$$

met: u_t = de bereikte eindsnelheid van het deeltje (m/s)
 v_0 = de gassnelheid (m/s)

Uit formule 4 valt af te leiden dat voor een hoge gravitatiedepositie het van belang is dat:

- de stofdeeltjes groot zijn (een grote massa hebben die blootstaat aan de valversnelling)
- de gassnelheid laag is (weinig verwaaiing)

Er hoeven strikt gezien aan deze vorm van depositie geen waterdruppels te pas te komen. Wel is het mogelijk dat er een gecombineerde depositie optreedt als waterdruppels worden gebruikt.

2.5 Elektrostatische depositie

Als gevolg van elektrostatische krachten kunnen geladen deeltjes naar een oppervlak bewegen (attractie-depositie). Ook kan de ladingsverdeling van ongeladen deeltjes worden beïnvloed door een elektrostatisch veld. Hierdoor kan ook een verplaatsing van deze deeltjes worden bewerkstelligd (inductie-depositie). De mate van deeltjesaf scheiding van deze twee vormen van elektrostatische depositie worden gekenmerkt door respectievelijk de scheidingsgetallen N_{sec} en N_{sei} . Deze eenheidsloze grootheden zijn als volgt gedefinieerd:

$$N_{SEC} = \frac{K_m Q_p \varepsilon_b}{\mu D_p v_0} \quad [5]$$

met: K_m = de Stokes-Cunningham correctiefactor (-)
 Q_p = de elektrische lading op het deeltje (C)
 ε_b = de potentiaalgradiënt op het invangende oppervlak (V/m)
 μ = de viscositeit van het gas (Pa·s)
 D_p = de diameter van het deeltje (m)
 v_0 = de gassnelheid (m/s)

Uit formule 5 kan worden afgeleid dat voor een efficiënte elektrostatische attractiedepositie het van belang is dat:

- de stofdeeltjes klein zijn
- de gassnelheid laag is
- de potentiaalgradiënt groot is
- de lading op de stofdeeltjes groot is

$$N_{SEI} = \left(\frac{\delta_p - 1}{\delta_p + 2} \right) \cdot \left(\frac{K_m D_p^2 \delta_0 \varepsilon_b^2}{\mu D_b v_0} \right) \quad [6]$$

met: δ_p = de diëlektrische constante van het deeltje (-)
 K_m = de Stokes-Cunningham correctiefactor (-)
 D_p = de diameter van het deeltje (m)
 δ_0 = de permittiviteit van de ruimte (F/m)
 ε_b = de potentiaalgradiënt op het invangende oppervlak (V/m)
 μ = de viscositeit van het gas (Pa·s)
 D_b = de diameter of andere karakteristieke lengte van het invangende oppervlak (m)
 v_0 = de gassnelheid (m/s)

Uit formule 6 kan worden afgeleid dat voor een efficiënte elektrostatische inductiedepositie het van belang is dat:

- de stofdeeltjes groot zijn
- de gassnelheid laag is
- de potentiaalgradiënt groot is
- de diëlektrische constante van de stofdeeltjes groot is

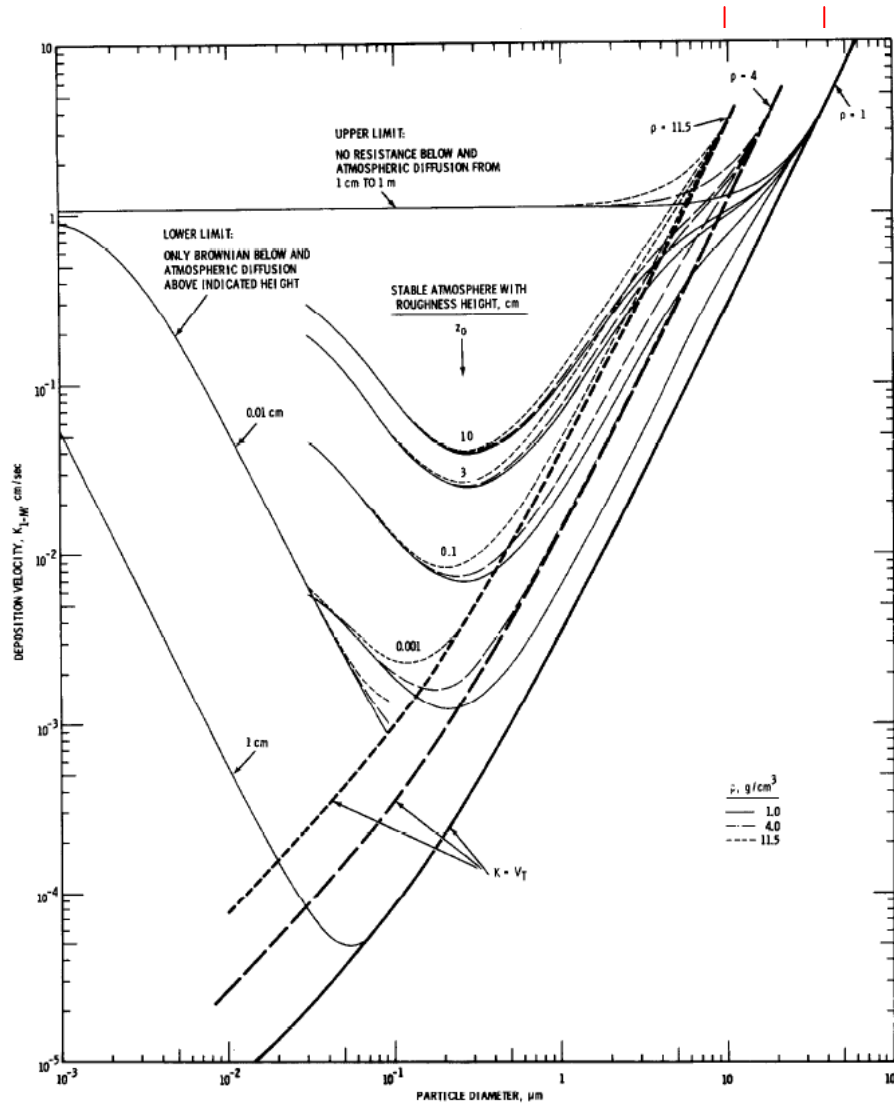
Wanneer door waterwassers deeltjes uit een luchtstroom van stallucht verwijderd moeten worden spelen vooral *inertiedepositie*, *stroomlijndepositie* en voor grote deeltjes *gravitatiedepositie* een rol. *Diffusiedepositie* speelt vooral een rol bij zeer kleine deeltjes die diffusie vertonen als gevolg van de Brownse beweging (< 0.3 μm). Vanwege de relatief grote luchtsnelheid door de geforceerde stalventilatie, zal deze vorm van depositie slechts een klein aandeel hebben op de totale depositie. Elektrostatische depositie speelt een rol wanneer de deeltjes geladen zijn, wat in geval van waterwassers niet van toepassing is. Deze vorm van depositie is daarom alleen voor de volledigheid opgenomen in dit rapport.

2.6 Interactie tussen stof en een wateroppervlak

In waterwassers worden stofdeeltjes niet alleen ingevangen via druppeldeeltjes maar in belangrijke mate ook door depositie van de deeltjes op het wateroppervlak van het pakkingsmateriaal. Figuur 2 geeft de interactie tussen stof en een wateroppervlak welke uitvoerig is beschreven in de literatuur. De eerste modellen gingen uit van een

constante depositiesnelheid. Sehmel³ breidde deze theorie uit door rekening te houden met de luchtsnelheid en de deeltjesgrootte. Verdere uitbreidingen van de theorie werden gedaan op het vlak van het meeslepen van druppels water door de luchtstroom⁴, en groei van de deeltjes als gevolg van de verhoogde relatieve vochtigheid boven het wateroppervlak.⁵ Figuur 2 laat zien wat de afhankelijkheid is van de depositiesnelheid als functie van de deeltjes dichtheid en deeltjes diameter bij een snelheid van 30 cm/s.

Figuur 2 Depositiesnelheid als functie van dichtheid en diameter. In rood: PM2.5 en PM10



Uit figuur 2 blijkt dat voor zeer kleine deeltjes ($<0.1 \mu\text{m}$) de Brownse beweging een grote rol speelt in de depositie op een wateroppervlak. Voor grotere deeltjes ($>1 \mu\text{m}$) gaan diffusiedepositie door wervelingen, gravitatiedepositie en inertiedepositie een rol spelen. De depositie van zwaardere deeltjes gaat in alle gevallen sneller dan de depositie van lichtere deeltjes. Neemt de ruwheid van het wateroppervlak toe, dan zal in alle gevallen een verhoging van de deeltjesdepositie plaatsvinden. Voor de exacte verwijderingsefficiëntie zijn geen relaties in de literatuur gevonden.

Afhankelijk van het ontwerp van de stofwassers, zal een of meerdere van de bovengenoemde depositietechnieken een rol spelen, en zal de uitvoering en dimensionering gericht dienen te zijn op de factoren die de efficiëntie van de overheersende depositie vergroten naast een eventueel benodigde aanpak van specifiek fijnstof. Daarnaast is efficiëntie van de wasser afhankelijk van de tijd die het deeltje in de wasser doorbrengt. Hoe langer de verblijftijd in de wasser is hoe groter de trefkans tussen water- en stofdeeltje is. De relatie tussen verblijftijd van de lucht in de wasser en de trefkans zijn niet bekend. Dit betekent dat de werkelijke reducties in PM10 en PM2.5 van de vier systemen in de praktijk gemeten zal moeten worden en bovenstaande theorie slechts aanwijzingen verschaft over hoe deze systemen zich in de praktijk zullen gedragen.

3 Systeembeschrijvingen

3.1 Algemeen

De luchtwassers zoals deze worden toegepast in de veehouderij, zijn in feite afstammelingen van intensieve gas-vloeistof interactie systemen afkomstig uit de chemische industrie. De basis voor een goed ontwerp van een nieuwe (chemische) fabriek ligt besloten in de empirische vervatte operationele kennis van talloze destillatiekolommen en gepakt-bed reactoren.⁶ Deze kennis is echter niet rechtstreeks toe te passen op luchtwassers, omdat de verhouding lucht : vloeistof in deze systemen vele malen hoger ligt dan die in *destillatiekolommen* en *gepakt-bed* reactoren.

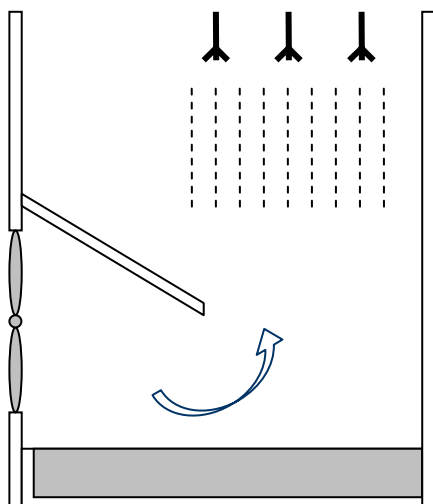
Voor stofwassers die zijn gebaseerd op luchtwassers geldt hetzelfde. Voor het merendeel van de kennis over de grootheden die nodig zijn voor het bereiken van een zekere mate van scheiding zijn geen empirische relaties uit de chemische industrie toepasbaar.

Luchtwassers kunnen op veel verschillende manieren worden uitgevoerd. Ze hebben gemeen dat ze de uitgaande stallucht bevochtigen met water en in aanraking brengen met wateroppervlak waardoor via verschillende mechanismen een groot deel van de stofdeeltjes uit de ventilatielucht neerslaat. Watergordijnen zijn in feite de meest eenvoudige uitvoering van luchtwassers. Watergordijnen zijn specifiek gericht op stofreductie, dit in tegenstelling tot luchtwassers die vooral gericht zijn op ammoniak- en eventueel geurreductie. In de praktijk zijn al verschillende ideeën ontwikkeld op het gebied van waterwassers voor de verwijdering van stof. Hierna volgt een overzicht van een aantal van deze ideeën en de beoordeling van hun mogelijke toepasbaarheid als waterwasser voor de reductie van stof uit pluimveestallen. Het hoofdstuk wordt afgesloten met rekenvoorbeelden waarin de eerder beschreven theorie wordt gekoppeld aan de beschreven systemen 1 en 3. Vanwege het afwijkende vloeistof / gas contactoppervlak kan deze theorie niet worden toegepast op systemen 2 en 4.

3.2 System 1

Het systeem is erop gebaseerd dat de stallucht via een schot over een bak met water geblazen wordt. Afvoer van de lucht vindt verticaal plaats door een watergordijn dat afwatert op de eerder genoemde bak. Een schematisch overzicht is gegeven in figuur 3.

Figuur 3 Schematische weergave van het systeem 1



Een belangrijk kenmerk is de plaat waardoor de lucht wordt afgebogen over het waterreservoir. Er wordt nog geëxperimenteerd om de meest effectieve hoek en lengte van deze plaat te vinden. Lengte en hoek van de plaat zullen met name invloed hebben op de ruwheid van het wateroppervlak. Hierdoor zal het aandeel van de verschillende deeltjes dat via deze weg wordt ingevangen afhangen van deze parameters. Ook de weerstand voor

luchttransport zal afhangen van de hoek en lengte van de schuine plaat. Immers, de resterende opening naar het watergordijn hangt af van deze grootheden.

De stofdeeltjes kunnen vervolgens na passage van het wateroppervlak via in tegengestelde richting stromende druppeltjes verder worden ingevangen. De hoge relatieve vochtigheid zal meewerken aan het vergroten/verzwaren van de stofdeeltjes waardoor de inertie en daardoor de invangefficiëntie zal toenemen.

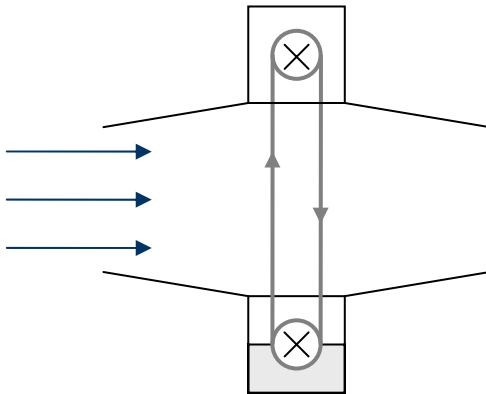
Een kritische factor bij de uitvoering van de in de theorie geschetste stroomlijn- en inertiedepositie is de homogeniteit van het watergordijn. Er mag geen verwaaiing van het watergordijn plaatsvinden, omdat anders een deel van de met stof beladen lucht alsnog het systeem verlaat.

Deze stofwasser (ontworpen door de heer Knol van Agrifirm) is nog in ontwikkeling en is ten tijde van het schrijven van dit rapport nog niet praktijkrijp.

3.3 System 2

Het systeem bestaat uit een verticaal geplaatste lopende band, gemaakt van een dun doek met gaatjes. De band loopt aan de onderkant van het apparaat door een bak met water. De vloeistof wordt voor een deel meegenomen met de band. Loodrecht op de bevochtigde band wordt de stallucht door de band geblazen, waardoor stofdeeltjes achterblijven in de band en de gezuiverde lucht verder kan stromen. De verzamelde deeltjes worden meegevoerd met de band en komen uiteindelijk terecht in de bak met vloeistof. Het systeem is schematisch weergegeven in figuur 4. Een foto van het prototype is weergegeven in figuur 5.

Figuur 4 Schematische weergave van het systeem 2



Figuur 5 Foto's van het prototype systeem 2



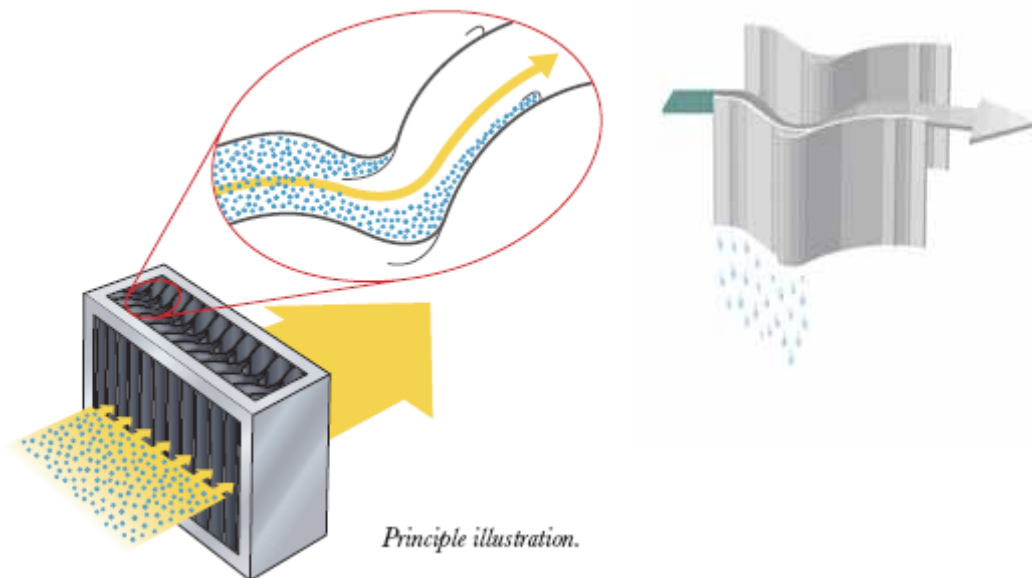
De uitvoering van een apparaat voor het wassen van stof volgens dit principe wordt sterk bepaald door de maximaal mogelijke afmetingen in de hoogte en breedte waarover een betrouwbaar bandsysteem gemaakt kan worden. Dit houdt in dat het apparaat niet of nauwelijks opgeschaald kan worden voor toepassing in de praktijk. Kritische factoren in de uitvoering zijn mechanische stabiliteit en het tegengaan van leklucht bij de overgangen tussen het bandsysteem en de behuizing.

Het systeem is in ontwikkeling op de North Carolina State University (NCSSU) en werkt als prototype. Het systeem is nog niet praktijkrijp.

3.4 Systeem 3

Het systeem bestaat uit een sproeisectie, gevolgd door een aantal parallel geplaatste platen waarop druppels worden ingevangen (zie figuur 6, de sproeisectie is niet ingetekend). De vorm van de platen is zodanig gemaakt dat de lucht een knik voorbij moet komen. Deze veroorzaakt turbulentie (hogere K_m) waardoor (zware) stofdeeltjes en waterdruppels door inertiedepositie terechtkomen op de platen. De platen staan boven een opvangbak voor het water dat door de zwaartekracht van de platen druppelt (gravitatiedepositie).

Figuur 6 Principe van de druppelvanger van systeem 3



Net als bij systeem 1, is het bij toepassing van een nevel voor het invangen van stof van belang dat er geen verwaaiing van de nevel plaatsvindt (homogeniteit). In dit systeem is het echter van minder belang dan in systeem 1, omdat de nageschakelde natte druppelvanger alsnog kan zorgen dat onbevochtigde lucht zijn stof kwijtraakt door inertie- en stroomlijndepositie.

Kritische factoren bij de uitvoering zijn vervuiling van de knik, dergelijke 'dode' ruimte in het stromingsprofiel van vervuilde lucht is in potentie een plaats waar ophoping van vuil zal kunnen plaatsvinden. Voor een goede werking van het systeem is voldoende afvoer van de vaste delen met het aanhangende water essentieel. Een tweede kritische factor is de mechanische stabiliteit van de lamellen. De knik over de lengterichting van de lamellen zorgt voor een vernauwing van de doorstroomopening tussen de lamellen. Hierdoor neemt lokaal de luchtsnelheid toe, waardoor er meer aanhangend water van de lamel meegenomen zal worden (venturi-effect). Een praktijktest bij verschillende vochtigheid van de lamellen en luchtsnelheid zal moeten uitwijzen of de lamellen gaan bewegen als gevolg van de turbulentie die hiermee gepaard gaat. Beweging van de lamellen is onwenselijk in termen van gelijke luchtbehandeling over het gehele pakket en mechanisch falen van de installatie.

Het systeem is nog niet in gebruik in Nederland, maar wel op praktijkschaal in Zwitserland in gebruik bij een voliërestal met droogtunnel en biologische luchtwasser, waar het als voorbehandelingstechniek voor de luchtwasser wordt ingezet om het grof stof uit de lucht te verwijderen. Het systeem dient voor de praktijk geoptimaliseerd te worden naar fijnstofverwijdering.

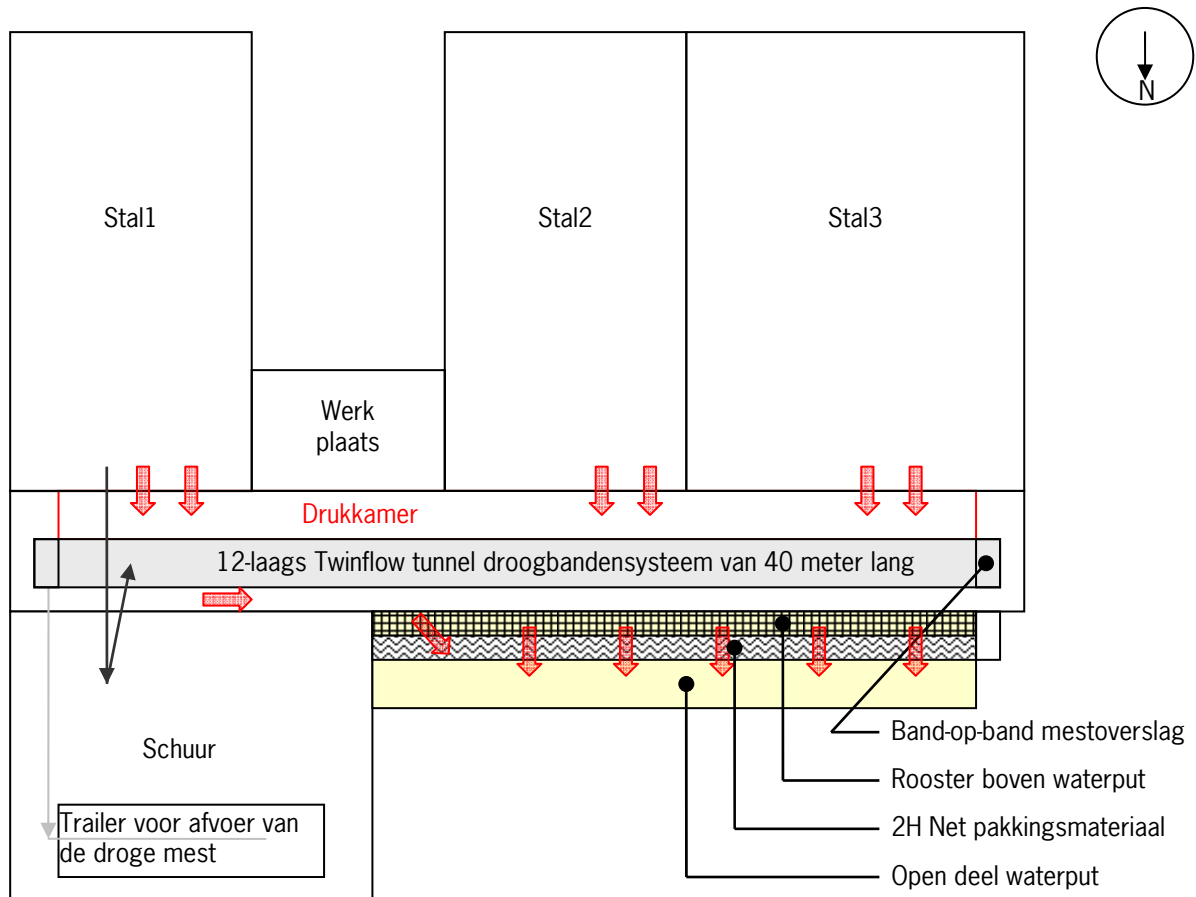
Het bedrijf Uniqfill heeft plannen om deze techniek als fijnstofverwijderaar in te zetten op een pluimveebedrijf.

3.5 Systeem 4

Het betreft hier een wassysteem met een gepakt bed (fabrikant 2H, type Net), dat continu wordt bevochtigd met water. Door de hoge relatieve luchtvochtigheid in het systeem kunnen stofdeeltjes vergroot/verzwaard worden waardoor de inertie wordt vergroot en de kans op verwijdering toeneemt. De stofdeeltjes kunnen weggevangen worden door zwevende waterdruppels in de pakketholtes maar zullen vooral door het wateroppervlak van het pakket zelf worden ingevangen. De stroomlijnrichting van de aangevoerde lucht zal door de holtes van het pakket vele malen drastisch worden gewijzigd waardoor inertiedepositie op het pakket wordt bewerkstelligd. Plaatselijk in het pakket zullen luchtsnelheden sterk toenemen en zullen wervelpatronen ontstaan waardoor de inertiedepositie zal worden gestimuleerd.

Het afgevangen stof uit de ventilatielucht wordt meegevoerd met het recirculatiewater van de wasser en komt terecht in een open put. Van daaruit wordt het water weer opgepompt om over het gepakte bed te worden verdeeld. Een schematische voorstelling van het systeem zoals dat momenteel draait in de praktijk is weergegeven in figuur 7.

Figuur 7 Bovenaanzicht systeem 4 met daarin de luchtstroming (dikke pijlen), de meststromen (natte mest donker grijs, droge mest licht grijs)



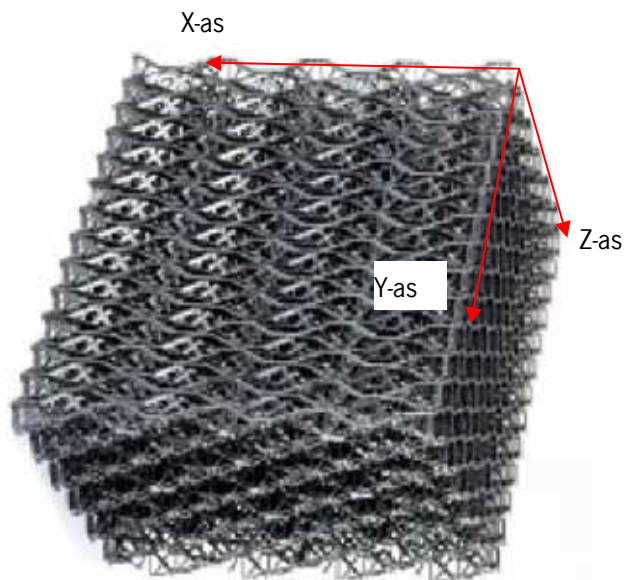
Omdat het hier om een reeds operationele opstelling gaat kan de dimensionering hier nader worden toegelicht. Op het bedrijf staan drie stallen met in totaal 145.000 opfokhennen. De maximale ventilatiebehoefte is gedimensioneerd op 480.000 m³/uur (uitgaande van 1 m³/uur per kg eindgewicht). Omdat begonnen wordt met kuikens, zal de gemiddelde ventilatiebehoefte ongeveer 192 000 m³/uur bedragen (40%). Om stank tegen te gaan is een 12-laags droogbandensysteem aangelegd op de kop van drie stallen. De gedroogde mest geeft een grote piek in de stofbelasting voor de omgeving als deze gedurende 1 uur per dag wordt afgedraaid.

Het gepakte bed (afmetingen 25 m lang; 4,5 m hoog; 0,60 m diep) heeft een inhoud van 67,5 m³. Dit houdt in dat een pakketje lucht minimaal 0,51 seconden in het pakket verblijft (bij hoge ventilatie, grote dieren). Gemiddeld zal de verblijftijd van de lucht in het pakket 1,26 seconden bedragen. Deze waarden zijn normaal bij chemische en biologische luchtwassystemen. Het is niet bekend of dit voldoende is voor het afvangen van zeer fijnstof (PM_{2,5}).

Ononderbroken wordt er per uur in totaal 240 m³ water over het gepakte bed gepompt door een viertal dompelpompen (elk 2.2 kWh). Per 100 m³ geïnstalleerde ventilatiecapaciteit wordt dagelijks 0.044 kWh verbruikt, uitgedrukt per dierplaats per jaar is dit gelijk aan een verbruik van 0.52 kWh. De gebruikte pompen staan onder water, elk in een opstaande open cilinder welke aan de zijkant is voorzien van vliegengaas. Door middel van een vlottersysteem wordt het waterpeil 10 cm boven de bovenrand van de geplaatste cilinders gehouden. Hierdoor zal het merendeel van het water dat de pompen bereikt, van bovenaf aanstromen. Dit beperkt de stofbelasting en verhoogt de levensduur van de pompen.

Het opgepompte water wordt via atmosferische uitloop door een drietal verdeelpijpen met uitstroomopeningen per pompsectie over de gehele lengte van het pakket verdeeld. Het geleverde debiet per buis kan per pompsectie worden aangepast. Hierdoor is het mogelijk om in het midden van het pakket meer water te doseren dan aan de randen. Dit is met name in de winterperiode van belang ter voorkoming van het aanvriezen van water.

Figuur 8 Bovenaanblik van het pakkingmateriaal gebruikt in systeem 4. Lucht stroomt door dit materiaal parallel aan de getekende X-as. De waterfase valt door de zwaartekracht in de richting van de getekende Z-as.



Systeem 4 is ontwikkeld door dhr. van Avendonk. Het draait al 4 jaar. Het bleek niet nodig om de vaste fase uit de put te halen via een spui, alhoewel er wel een dubbel rioleringssysteem hiervoor is aangelegd bij de constructie van de waterput. Voor verdamping van water wordt gecompenseerd door aanvoer van diep (200 m) grondwater. De verdamping bedraagt 6 tot 7 m³ per dag (normale temperatuur) en kan oplopen tot 26 m³ per dag bij extreem warm weer. Uitgaande van een jaargemiddelde van 10 m³ per dag, zal per 100 m³ geïnstalleerde ventilatiecapaciteit 2 liter water per dag worden verdampt. De belasting van het waswater met ammoniak is door de nageschakelde techniek voor mestdroging relatief laag.

3.6 Interactie tussen stof en waterdruppels: Theoretische uitwerking

In systemen 2 en 4 wordt gebruik gemaakt van een dragermateriaal voor de vloeibare fase. Hiervoor zijn geen theoretische formules bekend ter berekening van de invangefficiëntie of scheidingsgetal. Een theoretische uitwerking van deze systemen is hierdoor niet mogelijk.

Systemen 1 en 3 maken gebruik van het invangen van stof door individuele waterdruppels. Door de relatief hoge luchtsnelheid van globaal 3 m/s in systeem 3 en de te verwachten hoge luchtsnelheid in systeem 1, zal er voornamelijk een combinatie van inertie- en stroomlijndepositie in beide systemen optreden.

Voor het invangen van het stof in het watergordijn van systeem 1 en 3 zijn de volgende schattingen voor de praktijk te maken:

- $Re = 7,54 \cdot 10^4 \cdot v_0 \cdot D_b$. Met $v_0 = 3$ m/s en $D_b = 250$ μm , het Reynoldsgetal $Re = 56$, hetgeen ruim binnen de waarden voor laminaire stroming is. K_m ligt dus tussen 1 en 18.
- Afscheiding van stofdeeltjes: deeltjesgrootte (D_p) = 2.5 μm , dit is de maximumgrootte van PM 2.5, dichtheid ρ_p van 1000 kg/m^3
- Invangende druppels met een afmeting (D_b) tussen 1000 en 250 μm (geschat)
- Viscositeit van de lucht = $17,1 \cdot 10^{-6}$ Pa·s

Uit vergelijking 1 volgt voor het Scheidingsgetal N_{si} , waarmee voor bepaalde deeltjesgrootten de maximaal en minimaal te behalen waarden voor de invangefficiëntie bepaald kunnen worden uit figuur 1, de waarden zijn berekend voor twee druppelgroottes en voor 2 niveaus van K_m :

Voor druppelgrootte 250 μm :

Max $N_{si} = 4,4$ Deze waarde komt overeen met een invangefficiëntie van 90%

Min $N_{si} = 0,24$ Deze waarde komt overeen met een invangefficiëntie van 25%

Voor druppelgrootte 1000 μm :

Max $N_{si} = 1,1$ Deze waarde komt overeen met een invangefficiëntie van 65%

Min $N_{si} = 0,06$ Deze waarde komt overeen met een invangefficiëntie van 1%

Voor het invangen van stofdeeltjes met $D_p = 10$ μm (een factor 4x groter dan de gebruikte afmeting van de hierboven gebruikte waarde van $D_p = 2,5$ μm) neemt het scheidingsgetal met een factor $4^2 = 16$ toe (zie vergelijking 1). Daardoor neemt de minimale efficiëntie (N_{si}) bij de kleine druppelgrootte van 250 μm toe van 25% naar 90%, terwijl deze grootte voor de grote druppelgrootte van 1000 μm toeneemt van 1 naar 60%.

De overall verwijderingsefficiëntie in een systeem met alleen waterdruppels hangt af van de invangefficiëntie en de kans waarmee stofdeeltjes in de baan van de druppels komen. Dit betekent dat zowel de grootte van de waterdruppels als de hoeveelheid te versproeien water per eenheid te behandelen lucht essentiële parameters zijn. In de praktijk houdt dit in dat een hoger waterdebiet en het sproeien van kleinere waterdruppels een positief effect hebben op de verwijdering van stof.

4 Beoordeling effectiviteit en inzetbaarheid voor de praktijk

De systemen 1 en 2 zijn in het geheel nog niet toegepast in de praktijk. Systeem 3 wordt momenteel op één locatie in de praktijk toegepast, en systeem 4 wordt eveneens, zij het voor een afgeleid doel (grof stof), incidenteel in de praktijk toegepast. In alle gevallen ontbreekt informatie over de verwijderingsefficiëntie van PM10/PM2.5, gebruikseigenschappen en kosten. In dit hoofdstuk wordt op basis van de beschrijvingen en ervaringskennis met luchtwassers, een inschatting gemaakt van de effectiviteit en inzetbaarheid in de praktijk. De systemen kunnen zowel als stand-alone eenheid of in combinatie met andere systemen worden ingezet. Allereerst worden de beoordelingsparameters toegelicht. Via een scoringstabel worden de vier systemen voor elk van deze parameters kwalitatief beoordeeld met toelichting.

4.1 Parameters voor beoordeling effectiviteit en inzetbaarheid van wassers voor stofverwijdering

Rendement PM10/PM2.5

Op basis van de beschikbare gegevens wordt aangegeven welk verwijderingrendement voor fijnstof kan worden verwacht. Daarbij wordt o.a. gekeken naar de eigenschappen die de invangefficiëntie en de depositie naar wateroppervlaktes beïnvloeden, de verblijftijd in het systeem, de intensiteit waarmee water wordt gerecirculeerd. Ook facetten als preferentiële stroming waardoor delen van het sproeioppervlak worden onder- of overbelast spelen hierbij een rol. Daarnaast kan gekeken worden naar de economische optimalisatie voor een zo hoog mogelijke verwijdering van fijnstof per gependeerde euro. Dit leidt tot verschillende verwijderingrendementen tussen de wassers.

Mechanische stabiliteit van het systeem

Hoe meer draaiende onderdelen een systeem heeft, hoe groter de kans op het falen van een van deze delen. De gebruikte materialen dienen bestand te zijn tegen inwerking van de wasvloeistof gedurende langere tijd (in ieder geval de economische levensduur van ongeveer 15 jaar).

Systemen waar gebruik gemaakt wordt van verhoogde druk hebben een verhoogde kans op lekkage door mechanisch falen van leidingen en/of koppelingen en/of afsluiters. Nauwe doorstroomopeningen zoals bijvoorbeeld spuitkoppen kunnen gemakkelijk verstopt raken waardoor de homogeniteit van de invangende matrix in het geding komt.

Reinigbaarheid

De combinatie (grof) stof en water geeft een grote vervuiling van het deel van de installatie waar de lucht doorheen stroomt. Het betreft alle oppervlakken die daarmee in aanraking komen, en kan leiden tot een gedeeltelijke verstopping van de luchtstroom, die leidt tot verhoging van de drukval en dus het energieverbruik. Voor het goed functioneren van een afvangende matrix is het van belang dat gepakte materialen schoongemaakt kunnen worden. Ook uit hygiënisch oogpunt is het wenselijk om het systeem periodiek te kunnen reinigen.

Jaarkosten: vaste (kapitale) en variabele kosten

De vaste kosten voor de aanschaf van apparatuur komen in de vorm van afschrijvingen. De aanschafkosten voor luchtbehandeling van één stal lopen globaal uiteen van € 50.000,- tot € 150.000,-, afhankelijk van de complexiteit van het systeem en de benodigde automatische besturing ervan. Met een economische levensduur van 10 tot 15 jaar, komen de vaste jaarlijkse kosten dan ook uit tussen de € 2.000,- en € 15.000,- per jaar.

Daarnaast zijn ook de dagelijkse kosten van belang bij het maken van een keuze tussen de geschetste systemen. Het energieverbruik en de kosten voor afvoer van de vervuilde vloeibare fase moeten hierbij worden gerekend. Omdat in principe de afvoerkosten voor alle vier de systemen hetzelfde zijn, zullen verschillen in de dagelijkse kosten zich richten naar de mate van energieverbruik. Het energieverbruik is afhankelijk van de hoeveelheid te verpompen water en de druk nodig voor het versproeien ervan. In lagedruksysteem 4 staan dag en nacht vier pompen aan met een totale energiebehoefte van ongeveer 10 kWh. De elektriciteit die hiervoor nodig is, kost jaarlijks tussen de 3000 en 4000 euro. De hogedruksystemen 1 en 3 zullen in dezelfde grootteorde energie verbruiken (weliswaar een lager debiet, maar met een hogere druk). In systeem 2 zullen alleen de aandrijfmotoren van de lopende band energie vragen.

Een belangrijke parameter bij toepassing van nageschakelde technieken is de drukval bij de verschillende ventilatiebelastingen. Bij gepakte bedden (systeem 4) is de drukval bij een vast ventilatiedebiet hoger dan dat van beschreven watergordijnen (systemen 1 en 3). Als gevolg hiervan zullen de stallucht ventilatoren meer vermogen

nodig hebben bij toepassing van systeem 4. Elk van de installaties zal een eigen optimale verhouding fijnstofverwijdering/jaarkosten hebben (zie criterium rendement). De bij deze optimale uitvoering behorende kosten zullen tussen de wassers worden vergeleken.

Toepasbaarheid

Geeft aan of het systeem eenvoudig inpasbaar is in gangbare stalsystemen in de pluimveehouderij (stallen voor vleeskuikens en leghennen).

Afwenteling

Het inzetten van een systeem kan gepaard gaan met neveneffecten op diverse duurzaamheidsaspecten (milieu, dierenwelzijn, diergezondheid, arbeidsomstandigheden). Hierbij kan gedacht worden aan bovennormaal energieverbruik, maar ook toename van andere ongewenste emissies zoals bijvoorbeeld bij het moeten uitrijden of anderszins opwerken/verwerken van het gebruikte water. Voor een beoordeling van de geschiktheid voor inzet in de praktijk is het van belang potentiële risico's in beeld te brengen. Aangezien alle systemen eindigen met eenzelfde, verontreinigde waterfase, worden alle systemen op dit punt gelijk beoordeeld.

Implementatietijd in de praktijk

Deze parameter geeft aan of een systeem op korte termijn volledig operationeel is voor de praktijk.

4.2 Kwalitatieve beoordeling

Met plussen en minnen zijn de grootheden zoals beschreven in paragraaf 4.1 gescoord in tabel 2. Een positieve waardering in deze tabel geeft aan dat het systeem in kwestie goed presteert met betrekking tot de genoemde kenmerken ten opzichte van de andere systemen. Ter ondersteuning worden de beschrijving van de systemen hieronder samengevat:

Systeem 1: waterbak en watergordijn

Systeem 2: door waterbak roterende filterwand

Systeem 3: sproeiers gecombineerd met wand voor afvang stof en waterdruppels

Systeem 4: waterwasser met gepakt bed

Tabel 2 Beoordeling van de vier systemen, zie tekst voor definitie en toelichting beoordelingsparameters

Systeem	1	2	3	4
Rendement PM10/PM2.5*	-	-/+	+	++
Mechanische stabiliteit	+	-/+	+	+
Reinigbaarheid	+	+	-/+	+
Jaarkosten	-/+	-/+	+	+
Toepasbaarheid	+	+	+	+
Afwenteling**	-/+	-/+	-/+	-/+
Implementatietijd	-/+	--	-/+	+

* Vermoedelijke waarden: - (10-20%), -/+ (20-30%), + (30-50%), ++ (50-70%)

** Op grond van de te verwachten problemen met de reststroom hebben alle systemen dezelfde beoordeling gekregen voor deze parameter

Verwijderingrendement PM10/PM2.5

Van geen enkel systeem is via een directe meting bekend hoe hoog de stofverwijdering is. In principe kan in elk systeem het verwijderingrendement worden opgevoerd door meer energie en water te verbruiken. Bij een watergordijn kan bijvoorbeeld het rendement worden opgevoerd door meer water te versproeien per eenheid te behandelen lucht, of te gaan sproeien onder druk om de waterdruppels zo klein mogelijk te maken. Beide opties kosten meer energie.

Marktwerking gebiedt fabrikanten om de systemen te optimaliseren naar kg stof per gependeerde euro. De hier bij behorende verwachte rendementen worden vergeleken. In de volgende alinea's wordt per systeem de onderbouwing gegeven van de classificatie van de verwijderingrendementen genoemd in tabel 2.

Systeem 1

Het effect van het contact met het wateroppervlak van het reservoir is voor de kleine stofdeeltjes waarschijnlijk beperkt. Het belangrijkste deel van de werking zal moeten komen van de afvang door waterdruppels. Bij sproeisystemen zonder druppelvanger zijn eerder wervelingen mogelijk waardoor delen van de lucht onbehandeld

het systeem kunnen passeren. Deze wervelingen kunnen deels worden behandeld door een nat oppervlak zoals in systeem 3. Van belang is verder de druppelgrootte, de hoeveelheid water dat wordt versproeid per eenheid te behandelen lucht en de relatieve luchtsnelheid ten opzichte van de vallende waterdruppels. Voor elk van deze drie facetten geldt in dit systeem dat zij extra inzet van energie vragen om het rendement te verbeteren. Bij het verkleinen van waterdruppels moet er op gelet worden dat dit niet leidt tot uitstoot van water. Verder speelt bij verkleining van druppels een rol dat snel agglomeratie van druppels op kan treden waardoor de extra energie die nodig is om kleine druppels te vormen minder goed wordt benut. Door het ontbreken van een vaste uitwisselingsmatrix zal het systeem bij de tegenstroom van (te) grote lucht- en watervolumes problemen ondervinden doordat druppels gaan agglomereren en het uitwisselingsoppervlak wordt beperkt.

Systeem 2

Het afvangen van stof moet plaatsvinden via depositie op het bevochtigde screenoppervlak. De grootte van de poriën zullen hier van belang zijn. Te kleine poriën kunnen leiden tot vorming van een film die het screenoppervlak afdekt waardoor delen van het filter niet worden benut en de drukval sterk toeneemt. Naast poriegrootte is aanstroomsnelheid van belang, hoe hoger des te meer kans dat kleine deeltjes worden ingevangen. Het belangrijkste knelpunt in dit systeem is het beperkt aantal afvangmomenten, in de beschreven opstelling wordt het screen slechts tweemaal gepasseerd. In principe is het aantal passeermomenten eenvoudig te vergroten door extra lussen aan te brengen, dit vergroot echter de kans op mechanische problemen. Een aandachtspunt is het risico op lekverliezen via de wanden.

Systeem 3

Net als voor systeem 1 geldt hier dat geoptimaliseerd dient te worden naar druppelgrootte, hoeveelheid water en energieverbruik. Dit systeem heeft echter ruimere optimalisatiemogelijkheden omdat het is gecombineerd met de beschreven druppelvanger. Deze druppelvanger zal ook een effect hebben op het afvangen van stofdeeltjes. De snelheid door de druppelvanger dient te worden begrensd om ongewenste doorslag en nieuwvorming van druppels te voorkomen.

Systeem 4

Bekend is dat grofstofvorming een belangrijk obstakel kan zijn voor het goed functioneren van waspakketten, locale verstopping leidt tot overbelasting van andere delen van het pakket. In deze opstelling wordt voldoende water gebruikt en op een geschikte wijze in het systeem gebracht om dit probleem te vermijden. Hieraan zijn wel behoorlijke energiekosten verbonden voor het rondpompen van water. Verder zijn er extra energiekosten door de extra drukval. Op basis van eerste gegevens van fijnstofverwijdering uit luchtwassers bij varkensstallen is de verwachting dat de verblijftijd in het beschreven systeem voldoende lang is om een verwijdering van circa 60% fijnstof te realiseren. Door de toepassing van een vaste uitwisselingsmatrix is er meer speelruimte om het rendement door aanpassing van de dimensionering op te voeren, bv. door meer of minder pakketbreedte. De in de tabel 2 weergegeven beoordeling is gemaakt op een combinatie van de verblijftijd en de mate waarin de luchtfase gecontroleerd met de waterfase in contact gebracht wordt.

Mechanische stabiliteit van het systeem

Er is in de praktijk voldoende ervaring opgedaan om problemen bij het sproeien van recirculatiewater te ondervangen. Systeem 2 scoort lager vanwege de grote hoeveelheid bewegende delen.

Reinigbaarheid

De reiniging van alle systemen is relatief eenvoudig. In de systemen 2 t/m 4 zal voldoende water moeten worden gebruikt om verstoppingrisico's te vermijden. De systemen 2 en 4 kunnen in principe worden gereinigd terwijl ze in bedrijf zijn. Bij systeem 3 bestaat het risico dat de weerhaken in de druppelvanger verstopt kunnen raken waardoor de werking vermindert. Juist hier is dus aandacht nodig voor voldoende watergebruik. Op grond van de geometrie van de lamellen in systeem 3, krijgt dit systeem voor reinigbaarheid een lagere beoordeling dan de overige systemen.

Vaste (kapitale) en variabele kosten

De beschikbare informatie is te beperkt om dit criterium zwaar te laten meewegen. De investeringskosten per hoeveelheid te behandelen lucht zal gezien de omvang en de complexiteit van de uitvoering het laagst liggen voor systeem 1, gevolgd door 2, 3 en uiteindelijk systeem 4. Waarom? Variabele kosten zullen onder meer afhangen van de hoeveelheid water dat moet worden rondgepompt en versproeid. Systeem 4 heeft daarbij het voordeel dat er geen sproeikoppen nodig zijn omdat er met verdeelplaten boven de wasser wordt gewerkt. Alle systemen verbruiken energie voor de gecreëerde drukval, dit zal het laagst zijn voor systeem 1. Per ingezette hoeveelheid

energie en water is de verwachting dat systeem 3 en 4 door het toegepaste proces effectiever zijn in termen van de hoeveelheid verwijderde fijnstof dan de systemen 1 en 2.

Op grond van zijn mechanische complexiteit en verwachte onderhoud krijgt systeem 2 een lagere score voor jaarkosten. Systeem 1 krijgt eveneens een lagere score, omdat dit systeem een kleinere druppel nodig heeft voor eenzelfde verwijderingsefficiëntie als systemen 3 en 4. Dit kost meer energie.

Toepasbaarheid in de praktijk

Alle systemen kunnen aangebracht worden als nageschakelde techniek in opstellingen met lengteventilatie en worden daarom gelijkelijk beoordeeld voor de parameter toepasbaarheid.

Afwenteling

Voor alle systemen geldt aandacht voor spui van slibresten uit het recirculatiewater. Het niet verversen van water levert mogelijk ook risico's wat betreft extra stankproductie door ongewenste emissies door bacteriën. De vaste delen zijn voedingsbodems en kunnen bij afbraak leiden tot methaan, CO₂, H₂S en ammoniak.

De beoordeling gegeven in tabel 2 met betrekking tot afwenteling is licht negatief vanwege het feit dat genoemde waterfase verdere opwerking behoeft die gepaard kan gaan met emissies in andere compartimenten.

Implementatietijd

De systemen 1 en 2 zijn niet commercieel verkrijgbaar en krijgen daardoor een lagere score voor directe toepasbaarheid in de praktijk. Verwijdering te worden geoptimaliseerd en systeem 4 werkt al 4 jaar in Nederland. Alleen systeem 4 is reeds op praktijkschaal in Nederland gerealiseerd. Dit systeem krijgt daarom een positieve beoordeling. Van systeem 2 wordt verwacht dat er nog een aanzienlijke ontwikkeltijd moet volgen om problemen met de opschaling te overwinnen. Dit systeem wordt dan ook sterk negatief beoordeeld met betrekking tot de implementatietijd. Systeem 3 is momenteel in gebruik in Zwitserland maar dient daar niet voor de verwijdering van fijnstof.

5 Discussie

5.1 Vergelijking van systemen onderling

De besproken wasserconcepten verschillen met name in de wijze waarop de uitwisselingsmatrix voor lucht en water is georganiseerd. Systeem 1 en deels systeem 3 steunen voor een belangrijk deel op een open uitwisselingsruimte tussen druppels en ventilatielucht, zonder een vaste matrix voor het water. Het ogenschijnlijke voordeel hiervan is dat hierdoor relatief weinig drukverhoging in het systeem plaatsvindt en extra ventilatiekosten worden bespaard. Aannemelijk is echter dat de verwijderingrendementen voor fijnstof aanzienlijk lager zullen liggen dan in opstellingen met een gepakt bed omdat het gemiddeld beschikbare wateroppervlak en de verblijftijd veel lager liggen. Het opvoeren van rendementen in open systemen zal leiden tot meer energiegebruik, en kent grenzen omdat de uitwisselingsmatrix niet robuust is waardoor bij hoge tegenstromen problemen zullen optreden. Toepassing van 'open' systemen ligt daarom alleen voor de hand wanneer relatief beperkte verwijderingrendementen voor fijnstof voldoende (< 20-30%). Uitgaande van een dergelijke beperkte verwijderingopgave is het voorstelbaar dat deze open systemen dan het eerst in aanmerking komen omdat de jaarkosten per eenheid verwijderd fijnstof waarschijnlijk kleiner zijn dan in complexere installaties met gepakte bedden. Daar komt bij dat deze open systemen het inherente voordeel hebben dat zij niet gevoelig zijn voor verstopping door grofstofbelasting.

Systeem 2 (roterend filter) kent een bijzondere aanpak omdat in plaats van water rond te pompen, de matrix door het water wordt geleid. De aantrekkingskracht schuilt in de mogelijkheid grote verontreinigingen in het waterbad te verwijderen. Onbekend is of met deze aanpak ook energie kan worden bespaard door in plaats van water rond te pompen een roterend mechanisme in te zetten. Vergeleken met een gepakt bed opstelling is een belangrijk onderscheid dat het contactoppervlak gedurende de verblijftijd in het systeem beperkt is, tenzij het aantal 'loops' wordt opgevoerd waardoor echter ook de mechanische kwetsbaarheid toeneemt. Dit concept vraagt daarmee nog een behoorlijk ontwikkeling- en optimalisatietraject voordat het in de praktijk kan worden toegepast.

Systemen 2 en 4 en deels systeem 3 werken met een vaste uitwisselingsmatrix, hierdoor zal ongetwijfeld een grotere drukopbouw plaatsvinden. Deze opbouw is echter noodzakelijk om verwijderingrendementen op te voeren. Op deze wijze kan stofdepositie door een groot contactoppervlak gedurende de verblijftijd in het systeem gerealiseerd worden. Het forse extra energieverbruik voor het recirculeren van water en het doorvoeren van de ventilatielucht is dan ook onvermijdelijk wanneer hoge verwijderingrendementen zijn gewenst. Binnen zekere bandbreedtes kan hierin natuurlijk worden geoptimaliseerd. Deels gelden hier dezelfde vragen die ook spelen voor het wegvangen van ammoniak en geur. In de huidige generatie luchtwassers is daarom al de nodige ervaring verwerkt die ook voor waterwassers voor fijnstof kan worden toegepast. Systeem 4 maakt van deze ervaring volop gebruik en draait al enkele jaren naar tevredenheid van de gebruiker, alhoewel onduidelijk is welk rendement wordt gerealiseerd. Dat neemt niet weg dat de opstelling desgewenst nog verder kan worden geoptimaliseerd.

5.2 Toepassingen met een alternatieve wasvloeistof

In deze rapportage is uitgegaan van oplossingen gebaseerd op de interactie tussen vervuilde lucht en water als wasvloeistof. Toepassing van water als wasvloeistof is echter niet de enig mogelijke oplossing voor dit probleem.

De interactie tussen wasvloeistof en de in te vangen deeltjes heeft veel te maken met de energie-inhoud van het totale systeem. Oppervlak van deeltjes en druppels is energie, het is immers het overwinnen van de oppervlaktespanning (N/m) voor een specifiek oppervlak (m^2). Het product van beide is de energie-inhoud van het oppervlak ($Joule=N \cdot m$).

De energie-inhoud van het systeem is de som van de aanwezige oppervlakken. Veranderingen in de natuur vinden zodanig plaats, dat er altijd spontaan processen verlopen als daarbij de netto energie-inhoud van het natuurlijke systeem afneemt. Processen waarbij de energie-inhoud toeneemt, spelen zich *niet* spontaan af in de natuur. Van belang voor keuze van een wasvloeistof is daarom de oppervlaktespanning tussen de wasvloeistof en lucht. Deze parameter bepaalt hoeveel moeite het kost om druppels (oppervlak!) te vormen, maar is ook verantwoordelijk voor de mate waarin het deeltje wordt bevochtigd als het in aanraking komt met de wasvloeistof.

Waterdamp (met een oppervlaktespanning $\gamma_{lg} = 73 \cdot 10^{-3}$ N/m) heeft veel meer de neiging om samen te voegen tot grotere druppels als bijvoorbeeld oliemist (olijfolie, met $\gamma_{lg} = 33 \cdot 10^{-3}$ N/m, siliconenolie met $\gamma_{lg} = 16 \cdot 10^{-3}$ N/m). Het is dan ook makkelijker om olie in kleine druppels te vernevelen dan water. Maar het is juist de hoge energiewinst die ervoor zorgt dat water zoveel gunstiger reageert op een invallend deeltje. De impact heft immers een klein deel van het wateroppervlak op en er wordt een vloeistof - vast oppervlak gecreëerd. Dit gaat gepaard met een energieafname die groter is dan in het geval van botsing tussen een stofdeeltje en een oliedruppeltje.

Het gebruik van toevoegmiddelen aan de wasvloeistof met het doel de oppervlaktespanning te verlagen, geeft om dezelfde redenen een verslechtering van de interactie tussen deeltje en wasvloeistof. Bovendien kunnen deze stoffen schuimvorming bevorderen, waardoor de verstoorde waterige invangmatrix snel door de gasstroom meegevoerd kan worden. Dit is een instabiel proces met grote gevolgen voor de directe omgeving van het apparaat. Schuimvorming dient daarom vermeden te worden.

5.3 Gezondheidsrisico's van het gebruik van water als reinigingsvloeistof

Stof bestaat uit organisch materiaal (delen van veren, huidschilfers, mest, voer) en anorganisch materiaal (onder andere urinezuur verbindingen). Het is daarom aannemelijk dat er bacteriën zullen gaan groeien in de met stof vervuilde wasvloeistof.

In de installatie wordt stallucht in intensief contact gebracht met de (gerecirculeerde) wasvloeistof. Hierbij zal een deel van de wasvloeistof verdampen en als damp worden meegevoerd met de gasfase. Het is niet bekend of er hierbij een mogelijkheid bestaat voor bacteriën om met deze dampstroom mee naar buiten gevoerd te worden. Dit risico dient nader onderzocht te worden. Een parallel met mestverwerkende installaties uitgaande van geforceerde beluchting van mest lijkt hierbij getrokken te kunnen worden.

6 Conclusies

De hoofddoelstelling van deze rapportage is om potentiële praktijkoplossingen voor fijnstofreductie in de pluimveehouderij door toepassing van waterwassers in beeld te brengen. De eerste conclusie is dat alle beschreven vier systemen in principe geschikt lijken om fijnstof te verwijderen uit pluimveestallen, zij het dat de verwijderingpercentages zullen uiteenlopen van circa 20 tot circa 60%.

Hierop volgend is een uitspraak gewenst over effectiviteit, inpasbaarheid en efficiency. In tabel 2 is een beoordelingsoverzicht gegeven voor de verschillende parameters. Het algemene beeld hieruit is dat systeem 4 het meest positief wordt beoordeeld, systeem 3 wordt iets gunstiger beoordeeld dan systeem 1, terwijl de verwachtingen van systeem 2 het laagst zijn. Wanneer specifiek wordt gekeken naar de hoofdkenmerken inpasbaarheid, implementatietijd en effectiviteit (uitgedrukt in verwijderingrendement en jaarkosten) dan kan het volgende worden geconcludeerd :

- Inpasbaarheid: alle systemen kunnen ingezet worden in stalinrichtingen met lengteventilatie.
- Implementatietijd: de verwachting is dat voor systeem 2 nog een langdurig ontwikkelingstraject nodig is van minimaal een jaar. Systeem 1 kent een relatief eenvoudige opzet waardoor dat binnen een tijdstraject van 3-6 maanden gerealiseerd zou kunnen worden. Met het wandonderdeel van systeem 3 is al ervaring opgedaan, ook hier kan naar verwachting over een traject van 3-6 maanden verdere uitkristallisatie van de uiteindelijk benodigde apparatuur plaatsvinden. Systeem 4 is operationeel in de praktijk.

Effectiviteit: het ligt voor de hand elk van de vier gegeven wasserconcepten zo te optimaliseren dat de meest gunstige verhouding (kg fijnstof/€) wordt bereikt. Het bijbehorende verwijderingpercentage zal naar verwachting het hoogst liggen voor systeem 4, gevolgd door 3, 2 en 1. Gegevens ontbreken om benaderend in te schatten hoe bij deze verwijderingpercentages de daadwerkelijke verhouding (kg fijnstof/€) voor elk van de installaties ligt. Wanneer echter uitgegaan wordt van de wenselijkheid dat een zeker minimaal verwijderingniveau dient te worden bereikt (stel minimaal 30% fijnstof) dan zullen systeem 4 en 3 het eerst in aanmerking komen als meest effectief.

7 Aanbevelingen

In de pluimveehouderij bestaat de behoefte op korte termijn te kunnen beschikken over technieken voor fijnstof verwijdering. Waterwassers kunnen hierin een rol spelen. In termen van effectiviteit en snelle beschikbaarheid kan het best geïnvesteerd worden in de verdere uitwerking en validatie van de systemen 3 en 4. Tijdens de validatie van deze systemen zal onderscheid gemaakt moeten worden ten aanzien van de verschillende stof fracties (grof stof, PM10 en PM2.5). Systeem 1 kan interessant zijn voor bedrijfstoepassingen waar beperkte verwijderingspercentages (<20-30%) volstaan. Systeem 2 vraagt een lange ontwikkelingstijd waardoor deze niet op korte termijn in de praktijk kan worden geïmplementeerd.

Begrippenlijst

Destillatiekolommen

Industriële apparatuur voor het scheiden van vloeistoffen op basis van verschillende kooktemperatuur.

Diffusiedepositie

Depositie veroorzaakt door diffusiekrachten.

Effectiviteit

Mate waarin een apparaat succesvol is in het uitvoeren van een taak.

Gepakt-bed

Ruimte gevuld met een inert dragermateriaal dat dient ter vergroting van het uitwisselingsoppervlak tussen gassen en vloeistoffen.

Gravitatiedepositie

Depositie onder invloed van de zwaartekracht.

Inertiedepositie

Depositie door invangen van deeltjes die als gevolg van hun kinetische energie een baan afleggen die niet of nauwelijks wordt beïnvloedt door beweging als gevolg van zwaartekracht of diffusiekrachten.

Invangefficiëntie

Fractie van de deeltjes die door botsing met een van lucht afwijkende fase worden verwijderd uit een luchtstroom.

Inzetbaarheid

Mate waarin een apparaat als zodanig geschikt is om gebruikt te worden voor een taak.

Laminaire stroming

Laagvormige stroming van gas.

Lengteventilatie

Vorm van stalventilatie waarbij de ventilatie geschiedt over de lengteas van de stal.

Stroomlijndepositie

Depositie door invangen van bewegende deeltjes die botsen met een andere fase of andere deeltjes.

Turbulente stroming

Wervelende stroming van gas.

Waterwassers

Apparaten met een intensief water/gas contact waardoor schadelijke stoffen van de gasfase naar de waterfase worden getransporteerd.

Literatuur

1. Perry, R.H., Perry's Chemical Engineers' Handbook. 6th ed. 1984: MacGraw-Hill.
2. Langmuir, I. and K.B. Blodgett, A mathematical investigation of water droplet trajectories, in The collected works of Irving Langmuir. 1960, Pergamon Press: Elmsford, NY. p. 335-393.
3. Sehmel, G.A., Particle and gas dry deposition. Atmospheric environment, 1980. 14: p. 983-1011.
4. Hicks, B.B. and R.M. Williams. Transfer and depositions of particles to water surfaces. in Potential environmental and health effects of atmospheric sulfur deposition. 1979. ORNL Life sciences Symposium series.
5. Slinn, S.A. and W.G.N. Slinn, Predictions for particle deposition on natural waters. Atmospheric Environment, 1980. 14: p. 1013-1016.
6. Sinnott, R.K., Chemical engineering design. 3rd ed. Coulson & Richardson's Chemical Engineering. Vol. 6. 2001.