

Wageningen UR Livestock Research

Partner in livestock innovations



Rapport 452

Deeltjesgrootteverdeling en bronnen van stof in stallen

Samenvattende rapportage

Mei 2011



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,
2011

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
onderzoeksoopdrachten zijn de Algemene
Voorwaarden van de Animal Sciences Group
van toepassing. Deze zijn gedeponeerd bij de
Arrondissementsrechtbank Zwolle.

Abstract

In this report the particle size distribution of dust
and the contribution of different sources to dust
in animal houses is quantified

Keywords

Livestock, dust, particle sizes, sources

Referaat

ISSN 1570 - 8616

Auteur(s)

A.J.A. Aarnink
M. Cambra-López
H.T.L. Lai
N.W.M. Ogink

Titel

Deeltjesgrootteverdeling en bronnen van stof in
stallen

Rapport 452

Samenvatting

In dit rapport wordt de deeltjesgrootteverdeling
van stof en de bijdrage van verschillende
bronnen aan stof in stallen gekwantificeerd

Trefwoorden

Veehouderij, stof, deeltjesgrootte, bronnen

Rapport 452

Deeltjesgrootteverdeling en bronnen van stof in stallen

A.J.A. Aarnink

M. Cambra-López

H.T.L. Lai

N.W.M. Ogink

Mei 2011

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie

Voorwoord

Om te kunnen voldoen aan Europese normen voor de maximale concentraties van fijnstof in de buitenlucht, dienen in Nederland maatregelen te worden doorgevoerd die de emissie uit belangrijke bronnen terugdringen. Binnen dit kader is voor de belangrijkste combinaties van diercategorieën en stalsystemen onderzocht hoe de stofdeeltjes over de verschillende diameter-klassen zijn verdeeld en welke bronnen in de stal bijdragen tot de vorming van fijn stof. De verkregen basiskennis op deze terreinen verdiept en verbetert de kennis van het stofgeneratie proces in de stal en bevordert daarmee de ontwikkeling van effectieve stofreductiemethoden in de veehouderij.

Dit zeer arbeidsintensieve onderzoek, met een groot aantal bedrijfsbezoeken waar metingen zijn uitgevoerd en monsters zijn genomen, is uitgevoerd door Maria Cambra-López en Huong Thi Lai in het kader van promotieonderzoek. Delen van het hier gerapporteerde onderzoek zijn aangeboden of inmiddels geaccepteerd en gepubliceerd als wetenschappelijk artikel. Door hun grote inzet en toewijding kon in een relatief korte tijd belangrijke basisinformatie over stofemissie in de veehouderij op een gestandaardiseerde wijze worden vastgelegd, waarvoor dank. Dank geldt ook de ondernemers van praktijkbedrijven waar de metingen konden worden uitgevoerd.

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen het onderzoeksprogramma naar stofreductietechnieken voor de pluimveehouderij dat wordt gefinancierd door het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie.

Nico Ogink

Livestock Research coördinator onderzoek naar stofreductie in de pluimveehouderij
Wageningen UR Livestock Research

Samenvatting

Het effect van stof op de gezondheid van mens en dier wordt naast de concentratie van het stof in de lucht, ook voor een belangrijk deel bepaald door de deeltjesgrootteverdeling van het stof. Over het algemeen kan worden gesteld dat kleinere deeltjes dieper doordringen in het ademhalingsstelsel en daardoor een groter effect hebben op de gezondheid. Voor het effect van stof op de gezondheid van mens en dier is het van belang om stofconcentraties in stallen en stofemissies uit stallen te reduceren. Voor een goed begrip van de effectiviteit van reductietechnieken kan informatie over de herkomst van de stofdeeltjes, voor zowel de PM₁₀ (deeltjes < 10 µm) als de PM_{2.5} (deeltjes < 2,5 µm) klasse, een belangrijke bijdrage leveren. Het doel van dit project was inzicht te krijgen in de deeltjesgrootteverdeling van stof in verschillende, meest voorkomende, staltypen in Nederland. Daarnaast werd getracht inzicht te krijgen in de bijdrage van verschillende potentiële bronnen aan het stof in de stallucht.

Het onderzoek naar deeltjesgrootteverdeling is gedaan bij 13 verschillende combinaties van diercategorieën en staltypen. Deze diercategorieën / staltypen vertegenwoordigen een belangrijk deel van de huidige stallen in Nederland. Elke diercategorie / staltype werd op twee bedrijven onderzocht. Voor het stofbronnenonderzoek werd elk bedrijf eenmaal bezocht (voorjaar), terwijl voor het deeltjesgrootteonderzoek de bedrijven tweemaal werden bezocht (voorjaar en zomer). De volgende diercategorieën / staltypen werden onderzocht: vleeskuikens, leghennen in scharrelhuisvesting, leghennen in volièrehuisvesting, vleeskuikenouderdieren, vleeskalkoenen, biggen, vleesvarkens in traditionele huisvesting, vleesvarkens in moderne emissiearme huisvesting met droogvoer, vleesvarkens in moderne emissiearme huisvesting met brijvoer, zeugen in individuele huisvesting, zeugen in groepshuisvesting, melkvee in ligboxenstal en nertsen. Het onderzoek naar stofbronnen is met een beperkter aantal stallen uitgevoerd, namelijk bij: vleeskuikens, leghennen scharrel, leghennen volière, kalkoenen, biggen, vleesvarkens traditioneel, zeugen in groepshuisvesting en melkvee.

Op basis van deze studie kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De meeste deeltjes in stallen zijn kleiner dan 1,0 µm: gemiddeld 87,0%. Voor de buitenlucht is dit meer dan 99%.
- Gemiddeld komt meer dan de helft (52%) van de deeltjes kleiner dan 1,0 µm van buiten.
- Op basis van massa bestaat gemiddeld 97% van het stof in stallucht uit deeltjes tussen 2,5 – 32 µm: 50% in de range tussen 2,5 – 10 µm en 47% in de range 10 – 32 µm.
- Over het algemeen is het aantal en de massa van de deeltjes in alle deeltjesklassen (< 1,0 µm; 1,0 – 2,5 µm; 2,5 – 10 µm; 10 – 32 µm) in pluimveestallen hoger dan in varkensstallen en in varkensstallen hoger dan in melkvee- en nertsenstallen. De aantallen deeltjes in de verschillende klassen zijn voor melkvee- en nertsenstallen vergelijkbaar en niet sterk verschillend van die van de buitenlucht.
- Hoewel het merendeel van de deeltjes kleiner is dan 2,5 µm, maken deze deeltjes slechts een klein deel uit van de totale massa.
- Bij pluimvee is het merendeel van de deeltjes < 10 µm afkomstig van mest en, in wat mindere mate, van veertjes.
- Bij varkens is ook het merendeel van de deeltjes < 10 µm afkomstig van mest. Bij vleesvarkens en gaste en drachtige zeugen is een deel van de deeltjes afkomstig van huidschilfers. Op massaniveau neemt de bijdrage van huidschilfers aan het stof in de lucht bij deze varkenscategorieën belangrijk toe. Bij biggen is de bijdrage van huidschilfers aan stof in de lucht (op basis van aantallen en massa) gering.
- Voer blijkt bij alle pluimvee- en varkenscategorieën slechts een kleine bijdrage te leveren aan het stof in de lucht.
- Bij melkvee leveren verschillende bronnen (mest, zaagsel, stro, silage) een belangrijk aandeel in het aantal en massa stofdeeltjes in de stallucht. Voor de kleine deeltjes (< 2,5 µm) leveren de deeltjes die van buiten komen ook een belangrijke bijdrage aan het aantal deeltjes. Krachtvoer levert een vrij belangrijke bijdrage aan aantal en massa deeltjes van 2,5 – 10 µm.

Inhoudsopgave

Voorwoord

Samenvatting

1	Inleiding	1
2	Materiaal en methoden	2
2.1	Stallen	2
2.2	Methode deeltjesgrootteverdeling	2
2.3	Methode bronnen	3
2.4	Data analyse	5
2.4.1	Deeltjesgrootteverdeling	5
2.4.2	Bronnen	5
3	Resultaten en discussie	7
3.1	Deeltjesgrootteverdeling	7
3.2	Bronnen.....	12
	Conclusies	19
	Referenties	20
	Bijlage 1. Bijdrage bronnen aan deeltjes in stallucht	21

1 Inleiding

Stof in de veehouderij is al jarenlang een aandachtspunt vooral uit arbo-overwegingen en uit oogpunt van diergezondheid. De laatste jaren is daar de emissie van fijnstof naar de buitenlucht bijgekomen, aangezien de EU grenswaarden heeft gesteld voor maximale concentraties fijnstof in de buitenlucht. Er zijn normen gesteld voor deeltjes kleiner dan 10 µm (PM10) (Council directive 1999/30/EC, 1999) en voor kleiner dan 2,5 µm (PM2.5) (Council Directive 2008/50/EC, 2008). Deeltjes kleiner dan 10 µm kunnen worden ingeademd en afhankelijk van de grootte meer of minder diep doordringen in de luchtwegen en verder in het lichaam. Deeltjes kleiner dan 2,5 µm kunnen diep in de longen doordringen, tot in de alveoli.

Het effect van stof op de gezondheid van mens en dier wordt naast de concentratie van het stof in de lucht, daarom ook voor een belangrijk deel bepaald door de deeltjesgrootteverdeling van het stof. Over het algemeen kan worden gesteld dat kleinere deeltjes dieper doordringen in het ademhalingsstelsel en daardoor een groter effect hebben op de gezondheid. Naast de deeltjesgrootteverdeling wordt het effect van stof op de gezondheid tevens bepaald door de samenstelling van het stof. Uit onderzoek blijkt bijvoorbeeld dat aan stof gehechte endotoxine waarschijnlijk belangrijk bijdragen aan longproblemen bij veehouders (Preller *et al.*, 1995). De samenstelling van stof wordt belangrijk beïnvloed door de herkomst van stof (Aarnink *et al.*, 1999). Stof afkomstig van feces kunnen bijvoorbeeld veel micro-organismen en daarmee ook hoge gehalten aan endotoxine bevatten.

Vanwege het effect van stof op de gezondheid van mens en dier is het van belang om stofconcentraties in stallen en stofemissies uit stallen te reduceren. Voor een goed begrip van de effectiviteit van reductietechnieken kan informatie over de herkomst van de stofdeeltjes, voor zowel de PM10 als de PM2.5 klasse, een belangrijke bijdrage leveren. Deze informatie is tot dusver voor enkele diercategorieën zeer beperkt en voor andere in het geheel niet aanwezig. Er is behoefte aan deze kennis voor het verbeteren van inzicht in de effectiviteit van reductietechnieken.

Het doel van dit project was inzicht te krijgen in de deeltjesgrootteverdeling van stof in verschillende, meest voorkomende, staltypen in Nederland. Daarnaast werd getracht inzicht te krijgen in de bijdrage van verschillende potentiële bronnen aan het stof in de stallucht.

In dit project is aangesloten bij het project 'Update berekeningsmethodiek fijnstofemissie'. Op twee bedrijven van elke categorie in dit project zijn metingen gedaan aan de deeltjesgrootteverdeling en aan het kwantificeren van de bijdrage van de verschillende stofbronnen in de stal. Dit rapport is een samenvattende rapportage van het onderzoek. De resultaten van dit onderzoek zijn uitgebreid beschreven in vier wetenschappelijke publicaties die aangeboden zijn aan internationale tijdschriften (Cambra-López *et al.*, 2011a; Lai *et al.*, 2011; Cambra-López *et al.*, 2011b; Cambra-López *et al.*, 2011c). In hoofdstuk 2 wordt de materiaal en methode beschreven, in hoofdstuk 3 worden de belangrijkste resultaten van de onderzoeken gepresenteerd en in respectievelijk de hoofdstukken 4 en 5 worden de resultaten bediscussieerd en worden de belangrijkste conclusies getrokken.

2 Materiaal en methoden

2.1 Stallen

Het onderzoek naar deeltjesgrootteverdeling is gedaan bij 13 verschillende combinaties van diercategorieën en staltypen. Deze diercategorieën / staltypen vertegenwoordigen een belangrijk deel van de huidige stallen in Nederland. Elke diercategorie / staltype werd op twee bedrijven onderzocht. Voor het stofbronnenonderzoek werd elk bedrijf eenmaal bezocht (voorjaar), terwijl voor het deeltjesgrootteonderzoek de bedrijven tweemaal werden bezocht (voorjaar en zomer). De volgende diercategorieën / staltypen werden onderzocht, met tussen haakjes de naamgeving die in de rest van het rapport zal worden gebruikt: vleeskuikens (vleeskuikens), leghennen in scharrelhuisvesting (leg_scharrel), leghennen in volièrehuisvesting (leg_volière), vleeskuikenouderdieren (vkod), vleeskalkoenen (kalkoenen), biggen (biggen), vleesvarkens in traditionele huisvesting (vleesvarken_trad), vleesvarkens in moderne emissiearme huisvesting met droogvoer (vleesvarken_mod_droog), vleesvarkens in moderne emissiearme huisvesting met brijvoer (vleesvarken_mod_brij), zeugen in individuele huisvesting (zeugen_individueel), zeugen in groepshuisvesting (zeugen_groep), melkvee in ligboxenstal (melkvee) en nertsen (nertsen). De belangrijkste kenmerken van de onderzochte stallen voor de verschillende diercategorieën / staltypen worden weergegeven in tabel 1.

Het onderzoek naar stofbronnen is met een beperkter aantal stallen uitgevoerd, namelijk bij: vleeskuikens, leg_scharrel, leg_volière, kalkoenen, biggen, vleesvarken_trad, zeugen_groep en melkvee.

2.2 Methode deeltjesgrootteverdeling

De deeltjesgrootteverdeling werd gemeten met een stofspectrometer waarvan het werkingsprincipe is gebaseerd op lichtverstrooiing. De stofspectrometer (Grimm instrument model number 1.109, Grimm Aerosol Technik GmbH & Co., Ainring, Germany) bepaalde het aantal deeltjes in 30 grootteklassen met de volgende ondergrenzen (in μm): 0,25, 0,28, 0,30, 0,35, 0,40, 0,45, 0,50, 0,58, 0,65, 0,70, 0,80, 1,0, 1,3, 1,6, 2,0, 2,5, 3, 3,5, 4, 5, 6,5, 7,5, 8,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20, 25, en 30. De bovengrens van de grootste deeltjesklasse was 32 μm . Er werd bemonsterd met een debiet van 1,2 L min⁻¹ en aantallen deeltjes in de verschillende klassen werden met een interval van 1 min opgeslagen in de interne datalogger. Naast de deeltjesgrootte werd tevens de PM10 concentratie in massa gemeten, ook met een stofspectrometer (DustTrak monitor, TSI inc., 500 Cardigan road Shoreview, MN 55126-3996, USA). Met de DustTrak werd bemonsterd met een debiet van 1,7 L min⁻¹ en de waarden werden met een interval van 1 min opgeslagen in de interne datalogger.

De lucht werd zowel in de stal als buiten de stal (na elkaar) bemonsterd. In de stal werden de monsters genomen op een hoogte van circa 1,5 m vanaf de vloer en zo dicht mogelijk bij de luchtuitlaat. Buiten de stal werden de monsters aan de loefzijde (de zijde waar de wind vandaan komt) bij de luchtinlaat genomen. Aangezien stofconcentraties en deeltjesgrootteverdeling in de stal meer varieert dan buiten, werd de lucht in de stal gedurende 60 minuten en buiten de stal gedurende 30 minuten bemonsterd. De monsters werden allemaal gedurende de dag in de periode tussen 10:00 – 12:00 uur genomen. Tijdens de monsternamen waren geen mensen in de stal aanwezig. De monsternamen buiten startte direct na afloop van de monsternamen binnen.

2.3 Methode bronnen

Duplo stofmonsters werden genomen van de lucht in en buiten de stal op dezelfde locaties als voor de deeltjesgrootteverdeling. Aangezien bij monsternamen bij melkvee slechts één monsternamenapparaat beschikbaar was, werden de monsters in enkelvoud genomen. Monsters werden genomen met virtuele cascade impactoren (RespiCon, Wetzlar, Germany). Met deze impactoren kan stof in de deeltjesgrootte range $< 2,5 \mu\text{m}$ en tussen $2,5$ en $10 \mu\text{m}$ simultaan worden verzameld. Het stof werd opgevangen op polycarbonaat filters ($37 \text{ mm } \varnothing$, $5 \mu\text{m}$ pore size). De lucht werd bemonsterd met een debiet van $3,11 \text{ L min}^{-1}$ met behulp van een draagbare pomp (Genie VSS5, Buck Inc, U.S.). De monsternametijd hing af van de stofconcentratie in de stal en varieerde van 5 tot 60 minuten bij pluimvee en varkens en was 150 minuten bij melkvee. Op deze manier werd $5 - 20 \mu\text{g}$ aan deeltjes per cm^2 filteroppervlak verzameld. Op deze manier werden voldoende deeltjes verzameld zonder dat er sprake was van veel overlap van deeltjes. De monsternametijd van de buitenlucht varieerde tussen 30 en 120 minuten. Alle monsters werden 's morgens tussen 09:00 en 12:00 uur genomen.

Op elk bedrijf werden potentiële bronnen van stof bemonsterd: mengvoer (op alle bedrijven), mest (verse mest bij pluimvee en verse feces bij varkens en koeien), veren (bij pluimvee) en stro(oisel) (pluimvee en melkvee). Huidmonsters (schilfers en haren) zijn ook genomen bij varkens, maar alleen bij zeugen, omdat dit bij jonge dieren niet goed mogelijk was. Bij melkvee werd tevens een monster genomen van het ruwvoer (mengmonster van stro, maïs en grassilage). Per bron werd een representatief monster van $200 - 500 \text{ g}$ verzameld, behalve voor veren en huid, daar werd $10 - 50 \text{ g}$ verzameld per monster. De monsters werden bewaard in schone, afsluitbare polyethyleen zakken. Elk monster werd gedroogd gedurende 12 uur bij 70°C en vervolgens geplet in een balmolen gedurende 1,5 minuten bij 250 rpm. Deze monsters werden vervolgens één voor één in een stofgenerator gedaan. De stofgenerator bestond uit een luchtdicht vat met een mix-systeem dat het stofbronmonster in beweging kon brengen, zodanig dat het stof werd opgenomen in de lucht. Dit stof werd op dezelfde manier verzameld, met een virtuele cascade impactor, als in en buiten de stal. Ook hier werd een stofbelasting van het filter van $5 - 20 \mu\text{g}$ per cm^2 filteroppervlak nagestreefd.

Hoge resolutie 'Scanning Electron Microscopy' (SEM) (JEOL, JSM-5410) in combinatie met 'energy-dispersive X-ray analysis' (EDX) (Link Tetra Oxford Analyzer) werden toegepast voor het analyseren van elk deeltje op elementaire compositie en op morfologie. Elementen met atoomnummers ≥ 6 (vanaf koolstof) konden worden gedetecteerd. Van elk filter werden ten minste drie locaties gescand. Van elk luchtmonster werden 50 tot 75 deeltjes geanalyseerd; van elk bronmonster werden 25 tot 50 deeltjes geanalyseerd. Elk deeltje werd gekarakteriseerd op basis van chemische en morfologische eigenschappen.

De gekarakteriseerde deeltjes werden volgens twee methoden toegewezen aan de bronnen:

1. Op basis van classificatieregels in een beslissingsboom. De classificatieregels en de beslissingsboom zijn opgesteld aan de hand van de chemische en morfologische karakterisering van deeltjes afkomstig van de verschillende bronnen; deeltjes in de lucht die overeenkomstige karakteristieken hadden als een bepaalde bron werden toegewezen aan deze bron.
2. Op basis van multiple regressie van de elementaire samenstelling van de deeltjes.

Omdat methode 2 het meest nauwkeurig blijkt, zijn in dit rapport alleen de resultaten vermeld die verkregen zijn volgens deze methode. In Cambra-López *et al.* (2011b) zijn de resultaten vermeld volgens beide methoden.

Tabel 1 Karakterisering van de verschillende stallen in dit onderzoek (n=26)

	Dier-categorie ¹⁾	Bedrijf	Aantal dieren	Bezetting (aantal m ²)	Productie-cyclus (leeftijd in weken)	Monstername (leeftijd in weken)	Huisvesting	Voer	Ventilatie
Pluimvee	Vleeskuikens	1	52 000	20-24	0 – 6/7	4, 5	strooiselvloer	Automatische verstrekking kruimel en brok	Zij-inlaat; ventilatoren in eindgevel
		2	2 675			3, 4			
	Leg_scharrel	1	3 850	8.8-9	18 – ±75	52, 71	Strooiselvloer met beun en legnesten	Automatische verstrekking kruimel en brok	Zij-inlaat; ventilatoren in eindgevel
		2	16 500			22, 31			
	Leg_volière	1	2 5650	17-18	18 – ±75	52, 71	Strooiselvloer met voliëresysteem met mestbanden en legnesten	Automatische verstrekking kruimel en brok	Zij-inlaat; ventilatoren in eindgevel
		2	33 500			50, 59			
	Vkod	1	3 698	7.7 - 8.5	20 – 60	29, 39	Strooiselvloer met beun en legnesten	Automatische verstrekking kruimel en brok	Zij-inlaat; ventilatoren in eindgevel
		2	7 430			27, 37			
	Kalkoenen	1	4 750	3.0 – 3.4	4/5 – 21	12, 20	Strooiselvloer	Automatische verstrekking kruimel en brok	Natuurlijke ventilatie met zij-inlaat en nokuitlaat.
		2	3 800			10, 17			
Varkens	Biggen	1	75	2.9 – 3.3	4 – 10/11	4, 9	Gedeeltelijk rooster	Automatische verstrekking brok	Plafondventilatie
		2	125			6, 8	Volledig rooster	Automatische verstrekking brok	Deurventilatie
	Vleesvarken_trad	1	60	1.0 – 1.3	10/11 – 25/27	17, 20	Gedeeltelijk rooster	Automatische verstrekking brok	Plafondventilatie
		2	120			18, 24		Automatische verstrekking brok	Deurventilatie
	Vleesvarken_mod_droog	1	132			22, 16		Automatische verstrekking brok	Voergangventilatie
		2	144			20, 24		Automatische verstrekking brok	Voergangventilatie
	Vleesvarken_mod_brij	1	144			22, 19		Brijvoer	Voergangventilatie
		2	120			19, 24		Brijvoer	Voergangventilatie
	Zeugen_individueel	1	32	0.77	Diverse	Verschillend	In voerligboxen	Automatische verstrekking brok	Deurventilatie
		2	145					Automatische verstrekking brok	Plafondventilatie
	Zeugen_groep	1	46	0.4	Diverse	Verschillend	Voerboxen met uitloop	Automatische verstrekking brok	Plafondventilatie
		2	34					Automatische verstrekking brok	Klepventilatie
Melkvee	Melkvee	1	51	0,15	Diverse	Verschillend	Ligboxenstal	Ruwvoer (mais- en graskuil)	Natuurlijke ventilatie met windbreekgaas en gordijnen in de zij-inlaat en nokuitlaat
		2	150						
Nertsen	Nertsen	1	9 015	4-5	48 - 52	7, 17	Welzijnskooien	Brijvoer	Natuurlijke ventilatie met zij-inlaat met gordijnen en nokuitlaat
		2	5 086		48 - 52	6, 20			

¹⁾ leg_scharrel = leghennen in scharrelhuisvesting; leg_volière = leghennen in voliërehuisvesting; vkod = vleeskuikenouderdieren; kalkoenen = vleeskalkoenen; vleesvarken_trad = vleesvarkens in traditionele huisvesting; vleesvarken_mod_droog = vleesvarkens in moderne emissiearme huisvesting met droogvoer; vleesvarken_mod_brij = vleesvarkens in moderne emissiearme huisvesting met brijvoer; zeugen_individueel = zeugen in individuele huisvesting; zeugen_groep = zeugen in groepshuisvesting; melkvee = melkvee in ligboxenstal

2.4 Data analyse

2.4.1 Deeltjesgrootteverdeling

De aantallen deeltjes per deeltjesgrootteklasse werden tevens omgerekend naar massa van de deeltjes. Hierbij werd verondersteld dat de deeltjes bolvormig zijn en een soortelijk gewicht hebben van $1,0 \text{ mg mm}^{-3}$. Voor de analyses werden de verschillende deeltjesgrootte klassen samengevoegd naar de volgende klassen: $0,25 - 1,0 \text{ }\mu\text{m}$, $1,0 - 2,5 \text{ }\mu\text{m}$, $2,5 - 10,0 \text{ }\mu\text{m}$ en $10,0 - 32,0 \text{ }\mu\text{m}$. De statistische analyse voor bepaling van verschillen tussen de verschillende diercategorieën / staltypen werd uitgevoerd op log-schaal met Oneway Anova (Genstat Committee, 2010). Voor het maken van lijngrafieken werden de deeltjesklassen gestandaardiseerd naar klassenbreedten van $1 \text{ }\mu\text{m}$. Vervolgens werden de fracties in de verschillende klassen uitgezet in een lijngrafiek (Zhang, 2004). Voor de massa van de deeltjes in de verschillende klassen werd dezelfde standaardisatie toegepast.

2.4.2 Bronnen

Zoals hiervoor vermeld is de bijdrage van de verschillende bronnen aan het stof in de lucht gekwantificeerd met behulp van multiple lineaire regressie. De chemische elementaire samenstelling van de deeltjes afkomstig van individuele bronnen werd gekoppeld aan de chemische elementaire samenstelling van de deeltjes in de stallucht. De chemische samenstelling van de deeltjes werd verkregen met behulp van de SEM-EDX. De volgende elementen werden bepaald: stikstof (N), natrium (Na), magnesium (Mg), aluminium (Al), silicium (Si), fosfor (P), zwavel (S), chloor (Cl), kalium (K), calcium (Ca), ijzer (Fe), nikkel (Ni), koper (Cu), zink (Zn), zilver (Ag), lood (Pb), tin (Sn), chroom (Cr), kobalt (Co), barium (Ba), broom (Br), titanium (Ti), vanadium (V), antimonium (Sb) en goud (Au). Dit zijn de meest voorkomende elementen. De gemiddelde concentraties van de verschillende elementen in de fijne deeltjes ($< 2,5 \text{ }\mu\text{m}$) en in de grove deeltje (tussen $2,5$ en $10 \text{ }\mu\text{m}$) per stal waren de onafhankelijke variabelen, terwijl de gemiddelde concentraties van de elementen in de bronnen de onafhankelijke variabelen waren in het multiple regressiemodel. Het model wordt beschreven met vergelijking 1:

$$Y_{im} = \sum_{k=1}^n (f_{ikm} \times F_{ikm}) \quad (1)$$

Waar:

Y_{im} = relatieve concentratie van element i in het verzamelde luchtmonster ($< 2,5 \text{ }\mu\text{m}$ of tussen $2,5$ en $10 \text{ }\mu\text{m}$) op bedrijf m (gemiddelde van de duplo-monsters);

f_{ikm} = relatieve bijdrage van element i van bron k aan de deeltjes in de stallucht op bedrijf m. De som van de fracties is gelijk gesteld aan 1;

F_{ikm} = gemiddelde relatieve concentratie van element i in bron k op bedrijf m.

Uit de literatuur is voor de verschillende bronnen bekend wat het soortelijk gewicht is van de deeltjes en in welke mate de deeltjes afwijken van de bolvorm. Voor de berekeningen zijn de volgende soortelijke gewichten gebruikt (McCrone, 1992): $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ (veertjes), $2,6 \text{ g cm}^{-3}$ (voer), $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ (haar), $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ (mest en houtkrullen), $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ (huidschilfers) en $2,1 \text{ g cm}^{-3}$ (buitenlucht). De volgende correctiefactoren voor het volume van de deeltjes zijn gebruikt (Zhang, 2004): 1,06 (veertjes), 1,08 (voer), 1,06 (haar), 1,15 (pluimveemest), 1,36 (varkensmest), 1,06 (houtkrullen), 1,88 (huidschilfers), 1,08 (buitenlucht).

De massa van de deeltjes afkomstig van de verschillende bronnen kan als volgt worden berekend (Ott et al., 2008):

$$m = \rho_p \times v_p = \rho_p \times \left[\frac{4}{3} \times \pi \times r^3 \right] = \frac{\rho_p \times \pi \times \left(\frac{D_p}{S_v} \right)^3}{6} \quad (2)$$

Waar:

m = massa van deeltje;

ρ_p = soortelijke massa van deeltje;

v_p = volume van deeltje;

r = straal van een equivalent bolvormig deeltje;

D_p = diameter deeltje, zoals waargenomen, $D_p = 2 \times \sqrt{\frac{\text{Oppervlakte}}{\pi}}$

S_v = correctiefactor voor volume van het deeltje; dit is de correctiefactor om de diameter van het betreffende deeltje om te rekenen naar een deeltje met eenzelfde volume in bolvorm.

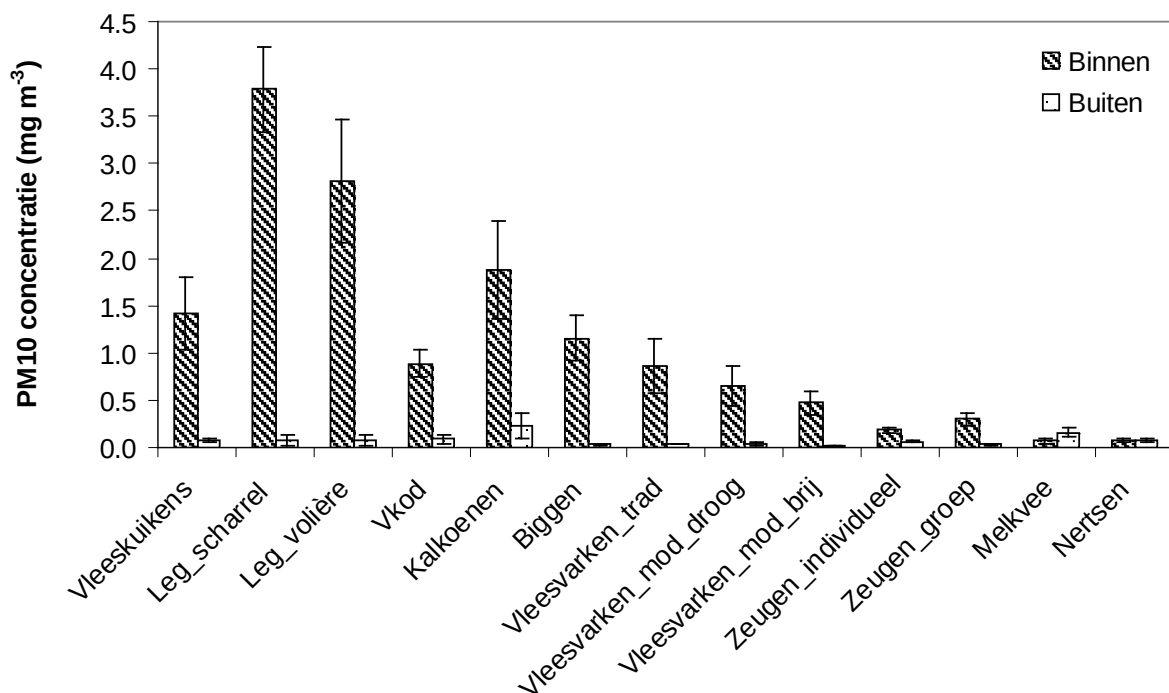
De analyses werden gedaan met het statistisch programma Genstat (Genstat Committee, 2010).

3 Resultaten en discussie

3.1 Deeltjesgrootteverdeling

PM10 massa concentraties waren het hoogst voor pluimveestallen ($0,83 - 4,60 \text{ mg m}^{-3}$), gevolgd door varkensstallen ($0,13 - 1,62 \text{ mg m}^{-3}$), melkveestallen ($0,02 - 0,12 \text{ mg m}^{-3}$) en nertsenstallen ($0,04 - 0,12 \text{ mg m}^{-3}$). Deze resultaten zijn vergelijkbaar met die van Takai et al. (1998), die dezelfde volgorde vonden in stofconcentraties voor pluimvee-, varkens- en melkveestallen. Deze onderzoekers hebben overigens geen PM10 gemeten, maar PM5. Ze vonden gemiddelde PM5 concentraties van $0,45 \text{ mg m}^{-3}$ in pluimveestallen, $0,23 \text{ mg m}^{-3}$ in varkensstallen en $0,07 \text{ mg m}^{-3}$ in melkveestallen.

Figuur 1 laat de gemiddelde PM10 massa concentratie zien voor de verschillende diercategorieën / staltypen. PM10 massaconcentratie was gemiddeld het hoogst bij leg_scharrel ($3,78 \text{ mg m}^{-3}$), gevolgd door leg_volière ($2,81 \text{ mg m}^{-3}$), kalkoenen ($1,87 \text{ mg m}^{-3}$), vleeskuikens ($1,42 \text{ mg m}^{-3}$), biggen ($1,15 \text{ mg m}^{-3}$), vkod ($0,89 \text{ mg m}^{-3}$), vleesvarken_trad ($0,87 \text{ mg m}^{-3}$), vleesvarken_mod_droog ($0,65 \text{ mg m}^{-3}$), vleesvarken_mod_brij ($0,47 \text{ mg m}^{-3}$), zeugen_groep ($0,30 \text{ mg m}^{-3}$), zeugen_individueel ($0,18 \text{ mg m}^{-3}$), nertsen ($0,07 \text{ mg m}^{-3}$) en melkvee ($0,07 \text{ mg m}^{-3}$). In algemene zin is dit volgens verwachting, aangezien 1) strooiselsystemen hogere stofproducties veroorzaken dan systemen zonder strooisel; 2) brijvoer minder stof geeft dan droogvoer, hoewel het verschil in dit onderzoek gering was; 3) individueel gehuisveste zeugen minder stof produceren dan in groepen gehuisveste zeugen vanwege een geringere dieractiviteit; 4) melkvee- en nertsenstallen hebben zeer lage stofconcentraties als gevolg van een lage stofproductie in combinatie met een relatief hoog ventilatiedebiet door de open stallen. De buitenconcentraties voor PM10 massa varieerden tussen $0,02$ tot $0,22 \text{ mg m}^{-3}$.



Figuur 1 Gemiddelde PM10 concentraties in de verschillende diercategorieën / staltypen in dit onderzoek. De lijnen bovenaan de staven geven de standaardfout van het gemiddelde. Leg_scharrel = leghennen in scharrelhuisvesting; leg_volière = leghennen in volièrehuisvesting; vkod = vleeskuikenouderdieren; kalkoenen = vleeskalkoenen; vleesvarken_trad = vleesvarkens in traditionele huisvesting; vleesvarken_mod_droog = vleesvarkens in moderne emissiearme huisvesting met droogvoer; vleesvarken_mod_brij = vleesvarkens in moderne emissiearme huisvesting met brijvoer; zeugen_individueel = zeugen in individuele huisvesting; zeugen_groep = zeugen in groepshuisvesting; melkvee = melkvee in ligboxenstal.

De meeste deeltjes in stallen zijn kleiner dan $1,0\ \mu\text{m}$: gemiddeld 87,0% van het totaal aantal deeltjes; 5,5% van de deeltjes zaten in de klasse tussen $1,0 - 2,5\ \mu\text{m}$; 7,3% in de klasse tussen $2,5 - 10\ \mu\text{m}$ en 0,24% in de klasse tussen $10 - 32\ \mu\text{m}$. In de buitenlucht (bij de luchtinlaat van de stal) waren 99,2% van de deeltjes kleiner dan $1,0\ \mu\text{m}$; 0,7% van de deeltjes zaten in de klasse tussen $1,0 - 2,5\ \mu\text{m}$; 0,1% in de klasse tussen $2,5 - 10\ \mu\text{m}$ en 0,005% in de klasse tussen $10 - 32\ \mu\text{m}$. Het aantal deeltjes dat in de buitenlucht werd gemeten in de klasse kleiner dan $1,0\ \mu\text{m}$ was gemiddeld 52% van het aantal dat binnen in deze klasse werd gemeten; dit was 5,6% voor de klasse tussen $1,0 - 2,5\ \mu\text{m}$; 0,7% voor de klasse tussen $2,5 - 10\ \mu\text{m}$ en 0,9% voor de klasse tussen $10 - 32\ \mu\text{m}$. De aantallen deeltjes in de verschillende (gepoolde) deeltjesgrootteklassen voor de verschillende huisvestingssystemen zijn weergegeven in tabel 2.

Tabel 2 laat zien dat in alle deeltjesklassen het gemiddelde aantal deeltjes hoger was in pluimveestallen dan in varkens-, melkvee- en nertsenstallen, behalve voor de vkod stallen, deze hadden vergelijkbare aantallen dan de varkensstallen voor alle deeltjesklassen. Gemiddeld waren de aantallen deeltjes in varkensstallen hoger dan in melkvee- en nertsenstallen voor alle deeltjesgrootteklassen, behalve voor deeltjes kleiner dan $1,0\ \mu\text{m}$. De aantallen deeltjes kleiner dan $1,0\ \mu\text{m}$ in varkens-, melkvee- en nertsenstallen verschilden niet veel van de aantallen die in deze deeltjesgrootteklasse in de buitenlucht werden gemeten. Dit bevestigt de hypothese dat de kleine deeltjes vooral van buiten komen (Zhang et al., 1998). De aantallen deeltjes in melkvee- en nertsenstallen waren min of meer vergelijkbaar en niet sterk verschillend van de aantallen deeltjes in de buitenlucht voor alle deeltjesgrootteklassen.

De aantallen deeltjes varieerden niet alleen sterk tussen verschillende diersoorten / staltypen, maar ook tussen stallen van dezelfde diersoort en staltype. Dit is te zien aan de relatief hoge standaardfouten van het gemiddelde. Dit wordt enerzijds veroorzaakt door het feit dat elk bedrijf zijn eigen manier van management en klimaatcontrole en specifieke stalrichting heeft en anderzijds door het feit dat de stallen op verschillende dagen in het jaar zijn bemonsterd en op verschillende momenten in de productiecycclus. Deze laatste factoren kunnen een belangrijk effect hebben op de ventilatiehoeveelheid en daarmee op de verdunning van de deeltjes met verse lucht.

Tabel 3 laat zien dat de deeltjesgrootteverdeling op massabasis wordt gedomineerd door de deeltjes in de klassen $> 2,5\ \mu\text{m}$. De deeltjes kleiner dan $1,0\ \mu\text{m}$ vertegenwoordigden gemiddeld 0,5% van de totale massa van de deeltjes; dit was 2,0% van de massa voor de deeltjes in de klasse $1 - 2,5\ \mu\text{m}$, 50,3% van de massa in de klasse $2,5 - 10\ \mu\text{m}$ en 47,3% van de massa in de klasse $10 - 32\ \mu\text{m}$. Voor de buitenlucht droegen de deeltjes kleiner dan $1,0\ \mu\text{m}$ voor 11,0% bij aan de totale massa van de deeltjes; dit was 5,9% van de massa voor de deeltjes in de klasse $1,0 - 2,5\ \mu\text{m}$, 17,1% van de massa in de klasse $2,5 - 10\ \mu\text{m}$ en 66,0% van de massa voor de deeltjes in de klasse $10 - 32\ \mu\text{m}$. Vergeleken met de stallucht had de buitenlucht kleinere massa's van de deeltjes voor alle deeltjesgrootteklassen. De massa van de deeltjes in de buitenlucht in de deeltjesgrootteklasse $< 1,0\ \mu\text{m}$ was gemiddeld 2,3% van de massa van de deeltjes in de stal in deze deeltjesgrootteklasse; dit was 0,3% van de massa van de deeltjes in de klasse $1,0 - 2,5\ \mu\text{m}$; 0,03% van de massa van de deeltjes in de klasse $2,5 - 10\ \mu\text{m}$ en 0,13% van de massa van de deeltjes in de klasse $10 - 32\ \mu\text{m}$.

Vergelijkbaar met de aantallen deeltjes waren de massaconcentraties in de verschillende deeltjesgrootteklassen in het algemeen hoger in pluimveestallen dan in varkensstallen en in varkensstallen waren deze hoger dan in melkvee- en nertsenstallen. Hoewel het merendeel van de deeltjes kleiner waren dan $2,5\ \mu\text{m}$ (tabel 2), maakten deze slechts een klein deel uit van de totale massa (tabel 3).

Tabel 2 Gemiddeld aantal deeltjes (per cm³) in de verschillende deeltjesgrootte klassen voor de verschillende diercategorieën/huisvestingstypen. De standaard fouten van de gemiddelden (s.e.m.) staan tussen haakjes ¹⁾

Categorie ²⁾	Deeltjesgrootteklassen			
	0,25-1,0 µm	1,0-2,5 µm	2,5-10,0 µm	10,0-32 µm
Vleeskuikens	434 (154) ^{abc}	21,4 (13,5) ^{bcd^{ef}}	37,5 (20,9) ^{de}	1,77 (0,70) ^{de}
Leg_scharrel	689 (152) ^{bc}	67,3 (13,2) ^{ef}	101,7 (20,2) ^e	2,45 (0,5) ^e
Leg_volière	747 (107) ^c	81,0 (19,3) ^f	108,4 (25,5) ^e	1,73 (0,20) ^{de}
Vkod	131 (12) ^{ab}	11,7 (1,9) ^{bcde}	16,0 (2,4) ^{cde}	0,52 (0,09) ^{cde}
Kalkoenen	422 (81) ^{abc}	46,6 (10,7) ^{def}	37,4 (10,1) ^{de}	1,35 (0,29) ^{de}
Biggen	243 (55) ^{abc}	17,8 (5,5) ^{cdef}	29,2 (8,0) ^{de}	1,22 (0,30) ^{de}
Vleesvarken_trad	258 (36) ^{abc}	12,9 (4,9) ^{bcd}	18,1 (6,5) ^{cde}	1,10 (0,40) ^{cde}
Vleesvarken_mod_droog	268 (57) ^{abc}	6,1 (1,8) ^{abc}	10,7 (3,4) ^{cd}	1,00 (0,30) ^{cde}
Vleesvarken_mod_brij	233 (77) ^{abc}	5,3 (1,0) ^{abc}	8,4 (1,9) ^{cd}	0,60 (0,10) ^{cde}
Zeugen_individueel	234 (60) ^{abc}	2,4 (0,4) ^{ab}	2,4 (0,2) ^{bc}	0,16 (0,02) ^{bc}
Zeugen_groep	211 (53) ^{abc}	5,2 (1,9) ^{abc}	5,9 (1,4) ^{cd}	0,33 (0,08) ^{cd}
Melkvee	179 (101) ^a	1,3 (0,6) ^a	0,8 (0,6) ^{ab}	0,03 (0,02) ^b
Nertsen	403 (74) ^{abc}	0,95 (0,10) ^a	0,10 (0,03) ^a	0,005 (0,002) ^a
Totaal gemiddeld (aantallen)	342 (79)	21,5 (6,9)	29,0 (10,1)	0,96 (0,35)
Totaal gemiddeld (% van totaal)	87	5,5	7,3	0,24
Buiten	179 (24)	1,2 (0,3)	0,19 (0,02)	0,009 (0,001)

1) Gemiddelden in een kolom die geen overeenkomstig superscript letter hebben zijn significant verschillend (P<0,05).

2) leg_scharrel = leghennen in scharrelhuisvesting; leg_volière = leghennen in volièrehuisvesting; vkod = vleeskuikenouderdieren; kalkoenen = vleeskalkoenen; vleesvarken_trad = vleesvarkens in traditionele huisvesting; vleesvarken_mod_droog = vleesvarkens in moderne emissiearme huisvesting met droogvoer; vleesvarken_mod_brij = vleesvarkens in moderne emissiearme huisvesting met brijvoer; zeugen_individueel = zeugen in individuele huisvesting; zeugen_groep = zeugen in groepshuisvesting; melkvee = melkvee in ligboxenstal

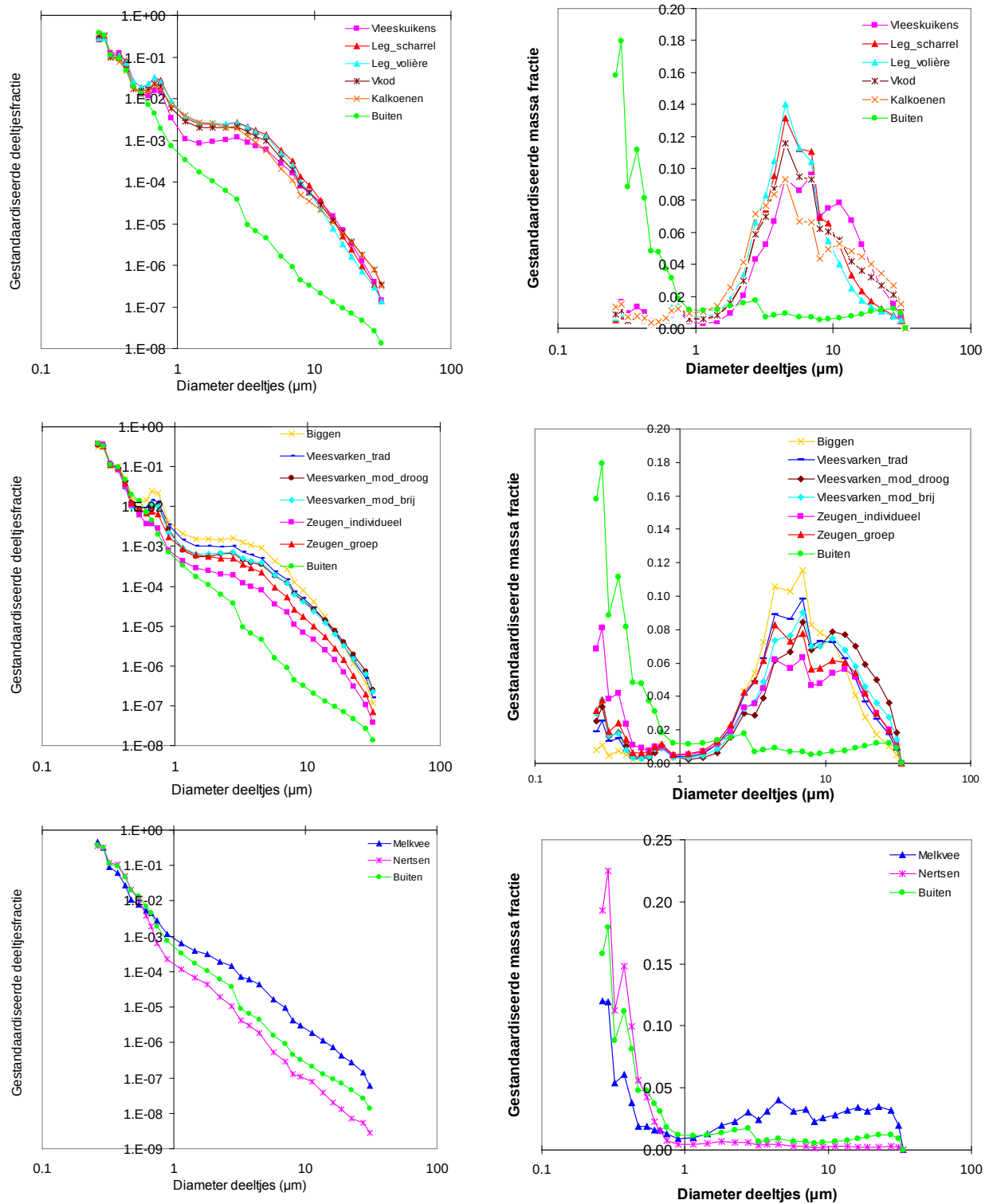
Figuur 2 laat de gestandaardiseerde fracties zien van het aantal deeltjes en van de massa van de deeltjes in respectievelijk de pluimvee-, de varkens- en de melkvee- en nertsenstallen. De gestandaardiseerde fracties van de deeltjes in de buitenlucht zijn voor vergelijking in al deze figuren opgenomen. De figuren laten duidelijke verschillen zien tussen de aantallen en de massa deeltjes voor de verschillende deeltjesgroottes. De meeste deeltjes komen voor in de gestandaardiseerde fractie < 1,0 µm, terwijl de grootste massa van de deeltjes voorkomt in de massafractie tussen 2,5 en 10 µm. In de figuren valt verder op dat het verloop van de gestandaardiseerde fracties voor de buitenlucht sterk verschilt van die voor de pluimvee- en varkensstallen. Voor de melkvee- en nertsenstallen zijn de verschillen veel minder groot.

Tabel 3 Gemiddelde massaverdeling van de deeltjes (mg m^{-3}) in de verschillende deeltjesgrootte klassen voor de verschillende diercategorieën/huisvestingstypen. De standaard fouten van de gemiddelden (s.e.m.) staan tussen haakjes ¹⁾

Categorie ²⁾	Deeltjesgrootteklassen			
	0,25-1,0 μm	1,0-2,5 μm	2,5-10,0 μm	10,0-32 μm
Vleeskuikens	0,020 (0,010) ^{bcd}	0,069 (0,040) ^{defg}	2,29 (1,17) ^{de}	2,77 (1,07) ^{de}
Leg_scharrel	0,043 (0,009) ^{cd}	0,204 (0,040) ^{tg}	5,89 (1,38) ^e	3,44 (0,56) ^e
Leg_volière	0,047 (0,008) ^d	0,239 (0,060) ^g	5,58 (1,18) ^e	2,66 (0,42) ^{de}
Vkod	0,007 (0,001) ^{ab}	0,035 (0,006) ^{cdef}	0,87 (0,14) ^{cde}	0,97 (0,15) ^{cde}
Kalkoenen	0,021 (0,004) ^{bcd}	0,131 (0,030) ^{efg}	1,72 (0,44) ^{de}	2,73 (0,58) ^{de}
Biggen	0,012 (0,003) ^{abcd}	0,054 (0,015) ^{defg}	1,93 (0,52) ^{de}	1,71 (0,39) ^{cde}
Vleesvarken_trad	0,010 (0,003) ^{abcd}	0,038 (0,014) ^{cde}	1,20 (0,44) ^{cde}	1,83 (0,71) ^{cde}
Vleesvarken_mod_droog	0,009 (0,002) ^{abc}	0,019 (0,006) ^{cd}	0,81 (0,26) ^{cd}	1,95 (0,60) ^{cde}
Vleesvarken_mod_brij	0,006 (0,001) ^{ab}	0,016 (0,003) ^{cd}	0,59 (0,14) ^{cd}	1,11 (0,27) ^{cde}
Zeugen_individueel	0,005 (0,001) ^{ab}	0,007 (0,001) ^{abc}	0,15 (0,02) ^{bc}	0,30 (0,04) ^{bc}
Zeugen_groep	0,006 (0,001) ^{ab}	0,015 (0,003) ^{bcd}	0,35 (0,08) ^{cd}	0,59 (0,15) ^{cd}
Melkvee	0,004 (0,002) ^a	0,003 (0,002) ^{ab}	0,040 (0,030) ^{ab}	0,083 (0,040) ^b
Nertsen	0,009 (0,002) ^{abcd}	0,002 (0,000) ^a	0,005 (0,001) ^a	0,012 (0,006) ^a
Totaal gemiddeld (massa)	0,015 (0,005)	0,064 (0,021)	1,65 (0,62)	1,55 (0,54)
Totaal gemiddeld (% van totale massa)	0,5	2,0	50,3	47,3
Buiten	0,005 (0,001)	0,002 (0,001)	0,007 (0,001)	0,027 (0,004)

1) Gemiddelden in een kolom die geen overeenkomstig superscript letter hebben zijn significant verschillend ($P < 0,05$).

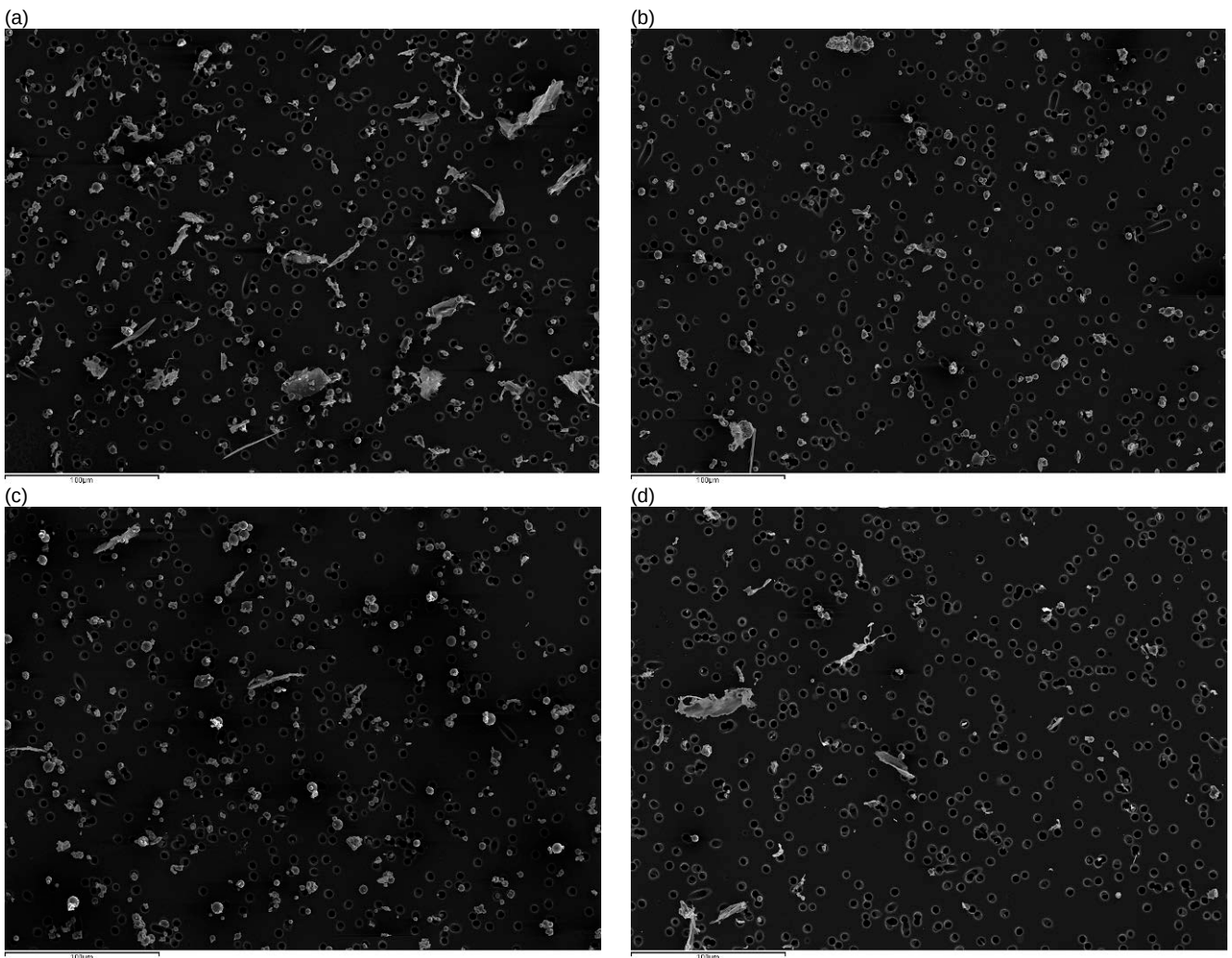
2) leg_scharrel = leghennen in scharrelhuisvesting; leg_volière = leghennen in volièrehuisvesting; vkod = vleeskuikenouderdieren; kalkoenen = vleeskalkoenen; vleesvarken_trad = vleesvarkens in traditionele huisvesting; vleesvarken_mod_droog = vleesvarkens in moderne emissiearme huisvesting met droogvoer; vleesvarken_mod_brij = vleesvarkens in moderne emissiearme huisvesting met brijvoer; zeugen_individueel = zeugen in individuele huisvesting; zeugen_groep = zeugen in groepshuisvesting; melkvee = melkvee in ligboxenstal

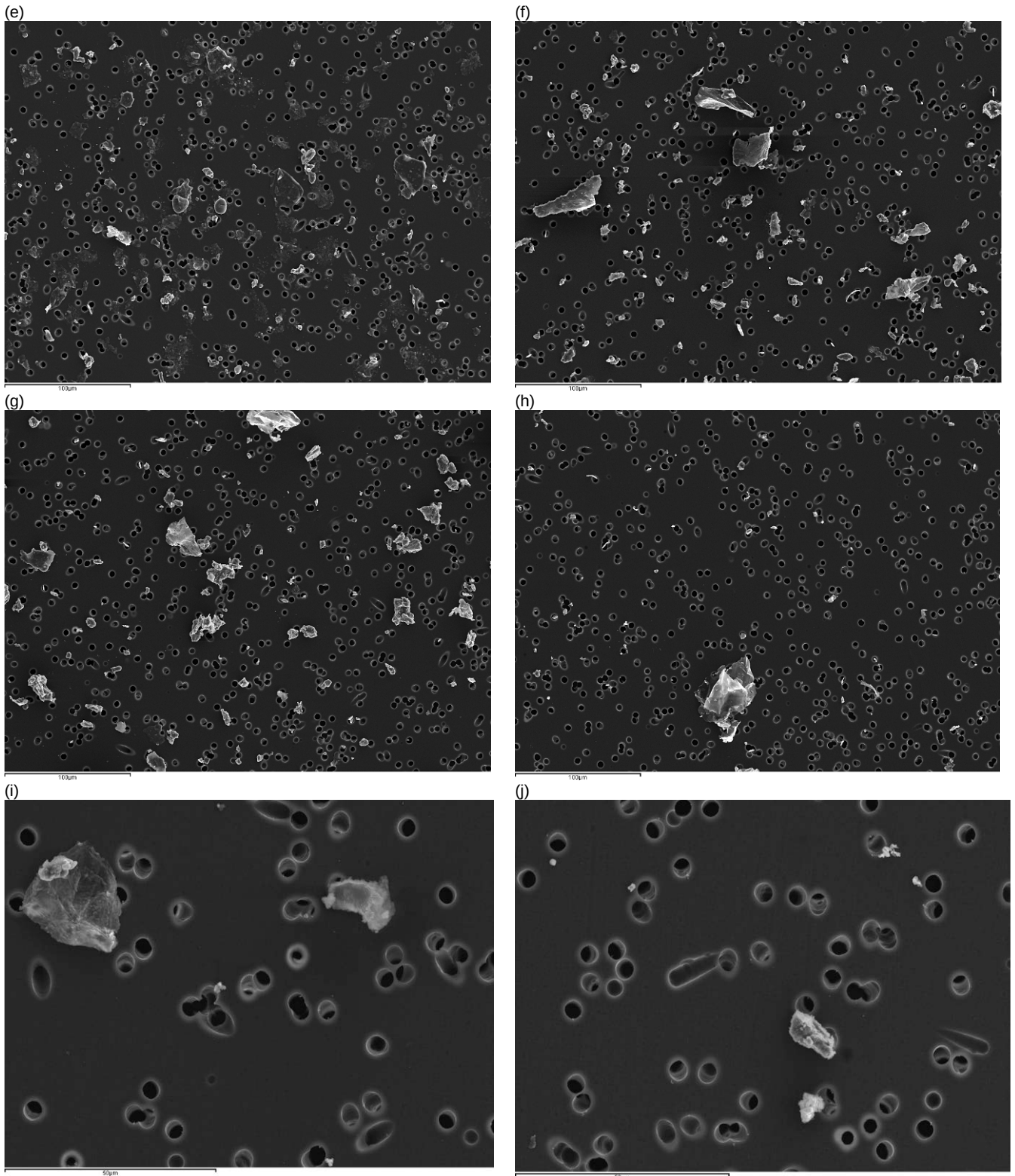


Figuur 2 Gestandaardiseerde fracties van het aantal deeltjes (figuren links) en de massa van de deeltjes (figuren rechts) in de verschillende grootteklassen voor de verschillende diercategorieën / huisvestingstypen.

3.2 Bronnen

Figuur 3 laat voorbeelden zien van deeltjes afkomstig van verschillende stalsystemen. In vleeskuikenstallen komt een mengsel van 'pluizige' deeltjes voor, waarschijnlijk afkomstig van veertjes (figuur 3a). Op deze foto zijn ook meer scherphoekige deeltjes van houtkrullen en ronde mestdeeltjes zichtbaar. Sommige deeltjes zitten als clusters bij elkaar. In leghennenstallen waren vooral ronde mestdeeltjes aanwezig (figuren 3b en 3c). In kalkoenenstallen waren veel gebogen, scherphoekige deeltjes en in wat mindere mate ronde deeltjes aanwezig afkomstig van mest (figuur 3d). In biggenstallen werden ronde, grijze, gladde deeltjes waargenomen, samen met enkele helder gelaagde mestdeeltjes (figuur 3e). In de volgende figuren zijn gelaagde, graanachtige mestdeeltjes en grote huidschilfers zichtbaar van biggenstallen (figuur 3f) en van vleesvarkenstallen (figuur 3g). Monsters uit stallen voor guste en dragende zeugen lieten zeer kleine deeltjes zien en enkele grote deeltjes afkomstig van de huid (figuur 3h). Deeltjes uit melkveestallen laten grote deeltjes zien, waarschijnlijk van silage (ruwvoer) (figuur 3i) en kleinere afgebroken deeltjes van mest (figuur 3j).





Figuur 3 Voorbeelden van foto's gemaakt met de elektronenmicroscop van stofdeeltjes in de range van 2,5 tot 10 μm op een polycarbonaat filter (de vele kleine rondjes zijn gaatjes in het filter met een diameter van 5 μm). (a) Deeltjes van een vleeskuikenstal; (b) Ronde deeltjes van een scharrelstal voor leghennen; (c) Ronde deeltjes van een volièrestal voor leghennen; (d) Deeltjes van een kalkoenenstal; (e en f) Deeltjes van een biggenstal; (g) Mengsel van onregelmatig gevormde deeltjes van een vleesvarkensstal; (h) Huidschilfer afkomstig van een stal voor guste en dragende zeugen; (i en j) Deeltjes van een melkveestal. De schaal die linksonder elke foto is aangegeven is 100 μm .

In totaal werden 1546 deeltjes geanalyseerd die kleiner waren dan 2,5 µm en 1670 deeltjes in de range tussen 2,5 en 10 µm. Resultaten van de multiple lineaire regressie voor het bepalen van het relatieve aantal deeltjes afkomstig van de verschillende bronnen worden getoond in figuur 4a voor pluimvee en in figuur 4b voor varkens en melkvee. De exact berekende percentages staan in tabel 4 (deeltjes < 2,5 µm) en tabel 5 (deeltjes tussen 2,5 en 10 µm) van bijlage 1. Tevens worden in deze tabellen weergegeven welk deel van de variatie kon worden verklaard met het statistisch model. In figuur 5 worden vergelijkbare resultaten getoond maar dan op basis van de relatieve bijdrage van de verschillende bronnen aan de massa van de deeltjes in de lucht. Tabellen 6 en 7 van bijlage 1 laten de exact berekende massapercentages zien.

Over het algemeen kan worden gezegd dat bij pluimvee het merendeel van de deeltjes afkomstig was van mest en, in wat mindere mate, van veertjes. Dit gold voor zowel voor de deeltjes < 2,5 µm als voor de deeltjes tussen 2,5 en 10 µm. De bijdrage van de veertjes was hoger bij vleeskuikens en kalkoenen dan bij leghennen. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de donsveertjes die vrijkomen bij deze groeiende dieren. Bij kalkoenen was er een behoorlijke bijdrage van het strooisel (33 – 34%), terwijl dit bij vleeskuikens gering was. Op massaniveau was bij leghennen het aandeel van de veertjes beduidend hoger dan op deeltjesniveau, terwijl dit bij vleeskuikens wat lager lijkt te zijn. Bij kalkoenen zijn de figuren op massaniveau vergelijkbaar met die op deeltjesniveau, alhoewel de bijdrage van de mest wat hoger lijkt te zijn op massaniveau. Het mengvoer levert bij alle pluimveecategorieën slechts een zeer geringe bijdrage aan het fijne stof.

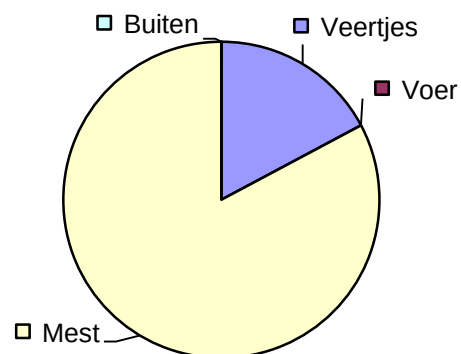
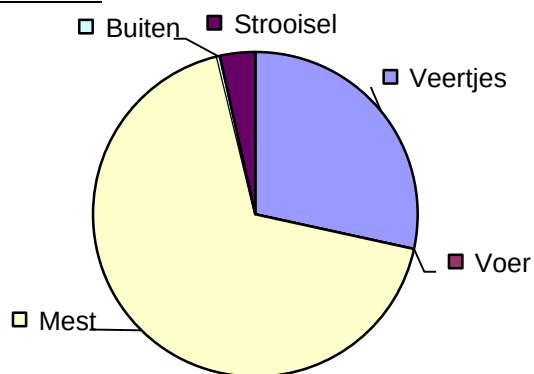
Bij varkens werden ook hoge bijdrages gevonden van mestdeeltjes aan het stof in de lucht. De bijdrage was vergelijkbaar voor de beide stoffracties. Na mest kwam bij vleesvarkens en guste en drachtige zeugen de grootste bijdrage van huidschilfers. Bij biggen was deze bijdrage echter zeer gering. Het (meng)voer had bij alle varkenscategorieën slechts een zeer beperkte bijdrage aan de stofdeeltjes in de lucht. Op massaniveau blijken huidschilfers bij vleesvarkens en guste en drachtige zeugen een belangrijk aandeel te leveren aan het stof in de lucht. Het aandeel van mest was op massaniveau een stuk geringer dan op deeltjesniveau bij deze varkenscategorieën. Bij biggen bleef de bijdrage van mestdeeltjes aan de massa van stofdeeltjes in de lucht ongewijzigd hoog. Ook op massaniveau was de bijdrage van voer aan het stof in de lucht gering.

Bij melkvee hebben verschillende bronnen een vergelijkbaar aandeel in het aantal stofdeeltjes in de lucht. Voor de kleine deeltjes (< 2,5 µm) leveren de deeltjes die van buiten komen ook een belangrijke bijdrage. Belangrijke bronnen zijn de mest, het stro dat vooral als ligbed voor het jongvee wordt gebruikt, zaagsel en silage (ruwvoer). Het mengvoer heeft bij de grotere deeltjes (tussen 2,5 en 10 µm) een relatief grote bijdrage, terwijl dit bij de kleine deeltjes (< 2,5 µm) verwaarloosbaar was. Op massaniveau neemt bij de kleine deeltjes (< 2,5 µm) het aandeel van stro toe, ten koste van het aandeel van de deeltjes die van buiten komen. Ook bij de deeltjes tussen 2,5 en 10 µm neemt de bijdrage van de deeltjes die van buiten komen af. Deze deeltjes zijn op massaniveau vooral afkomstig van zaagsel, stro, silage (ruwvoer), mengvoer en mest.

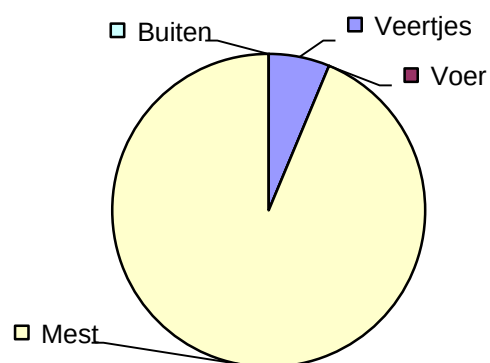
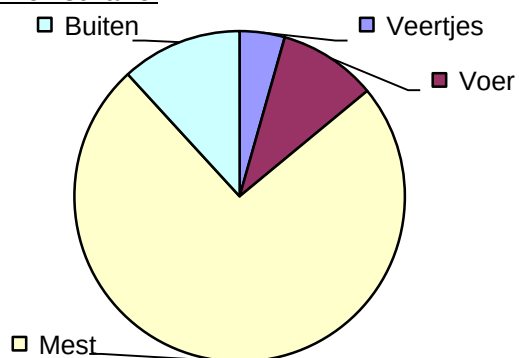
Bedenk dat er vrij grote spreidingen zitten rond de schattingen van de bijdrages van de verschillende bronnen. Dit wordt voor een deel veroorzaakt doordat slechts eenmalig gedurende een korte periode (5 tot 60 min bij pluimvee en varkens en 150 min bij melkvee) luchtmonsters zijn genomen in de stallen. Het luchtmonster hoeft daarom niet representatief te zijn voor het gehele jaar. Daarnaast is bekend dat het schatten van bronbijdragen aan stof omgeven is met vrij grote variaties. Voor meer details hierover verwijzen we naar Cambra et al. (2011b).

De resultaten laten, echter, een duidelijk beeld zien van welke bronnen belangrijk zijn en welke minder of onbelangrijk zijn. Mest levert bij alle pluimvee- en varkenscategorieën een belangrijke bijdrage aan het stof in de lucht. Hierna volgen veertjes en huidschilfers. Mengvoer blijkt bij alle pluimvee- en varkenscategorieën een kleine bijdrage te leveren aan het stof in de lucht. Bij varkens werd in eerdere onderzoeken wel een belangrijke bijdrage van het voer aan het stof in de lucht gevonden (Heber *et al.*, 1988; Aarnink *et al.*, 1999; Aarnink *et al.*, 2004). Dit kan aan de ene kant te maken hebben met het feit dat in deze onderzoeken totaal stof werd gemeten en voerdeeltjes in het algemeen relatief groot zijn en aan de andere kant met het feit dat voerpellets van steeds betere kwaliteit zijn geworden, waardoor ze minder snel uit elkaar vallen en verstoffen.

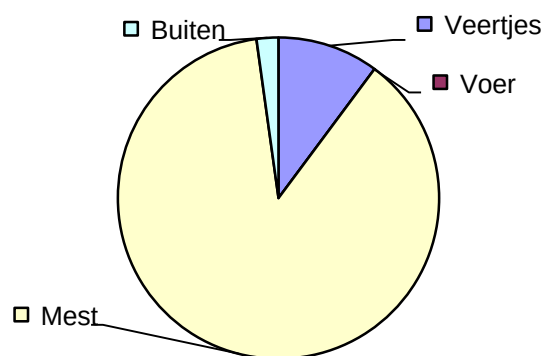
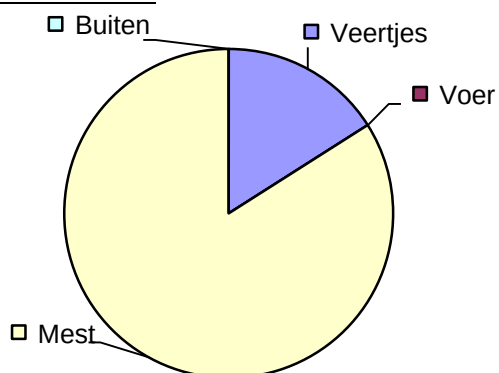
Vleeskuikens



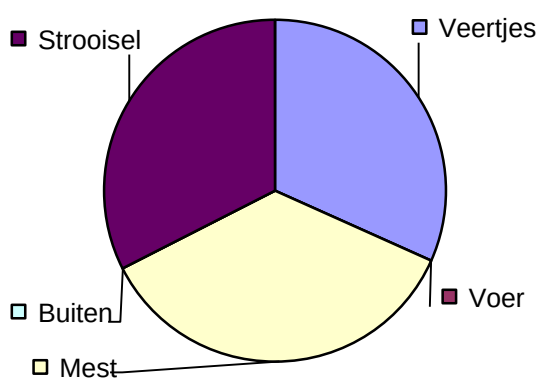
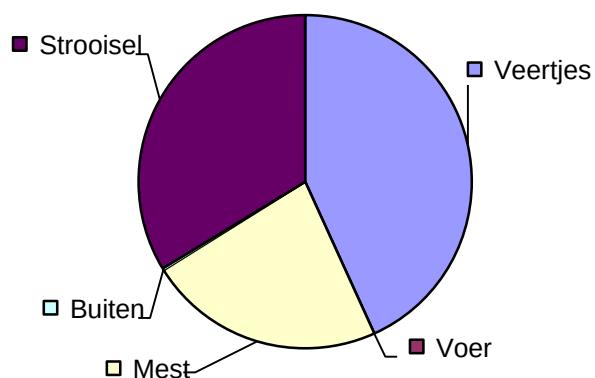
Leghennen scharrel



Leghennen voliëre

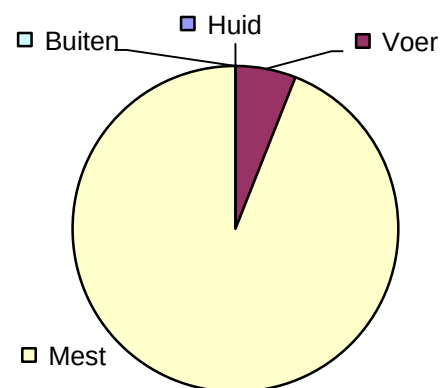
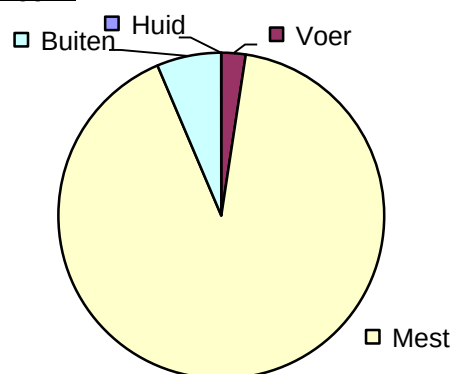


Kalkoenen

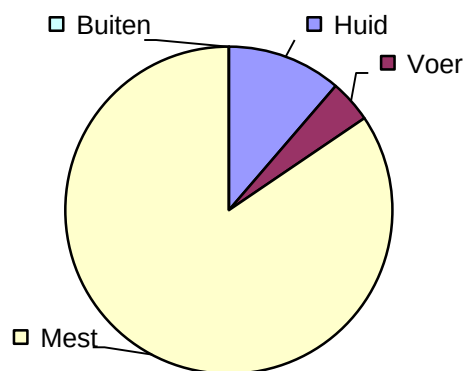
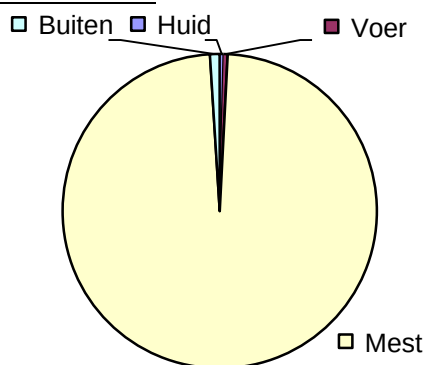


Figuur 4a Bijdrage van de verschillende bronnen aan aantal deeltjes in de lucht van pluimveestallen. Links: deeltjes < 2,5 µm; rechts: deeltjes 2,5 – 10 µm. Voer = mengvoer.

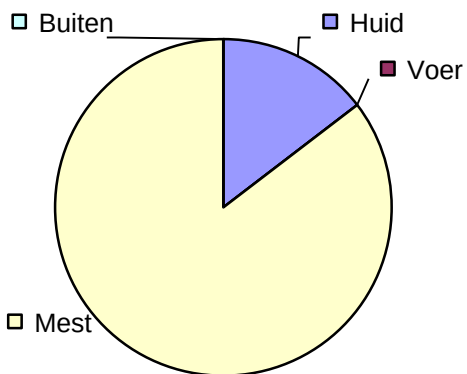
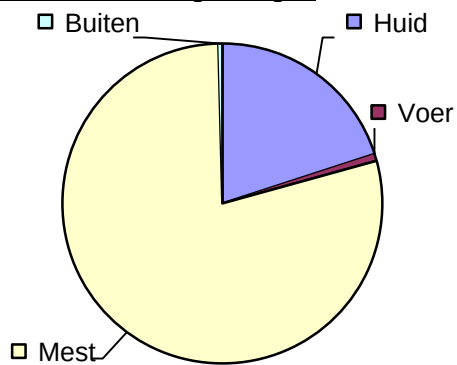
Biggen



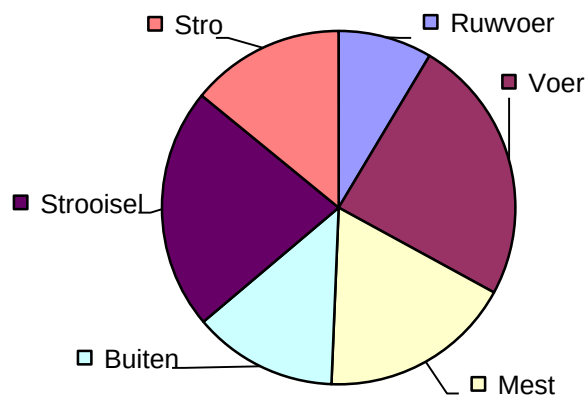
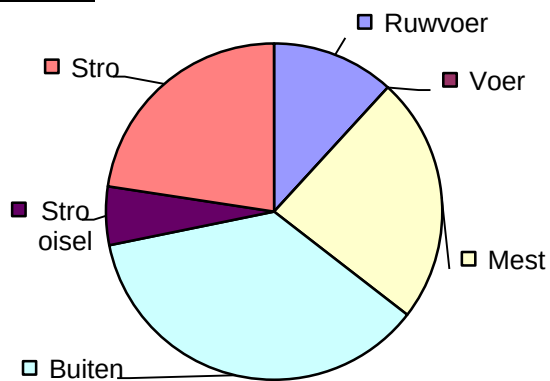
Vleesvarkens



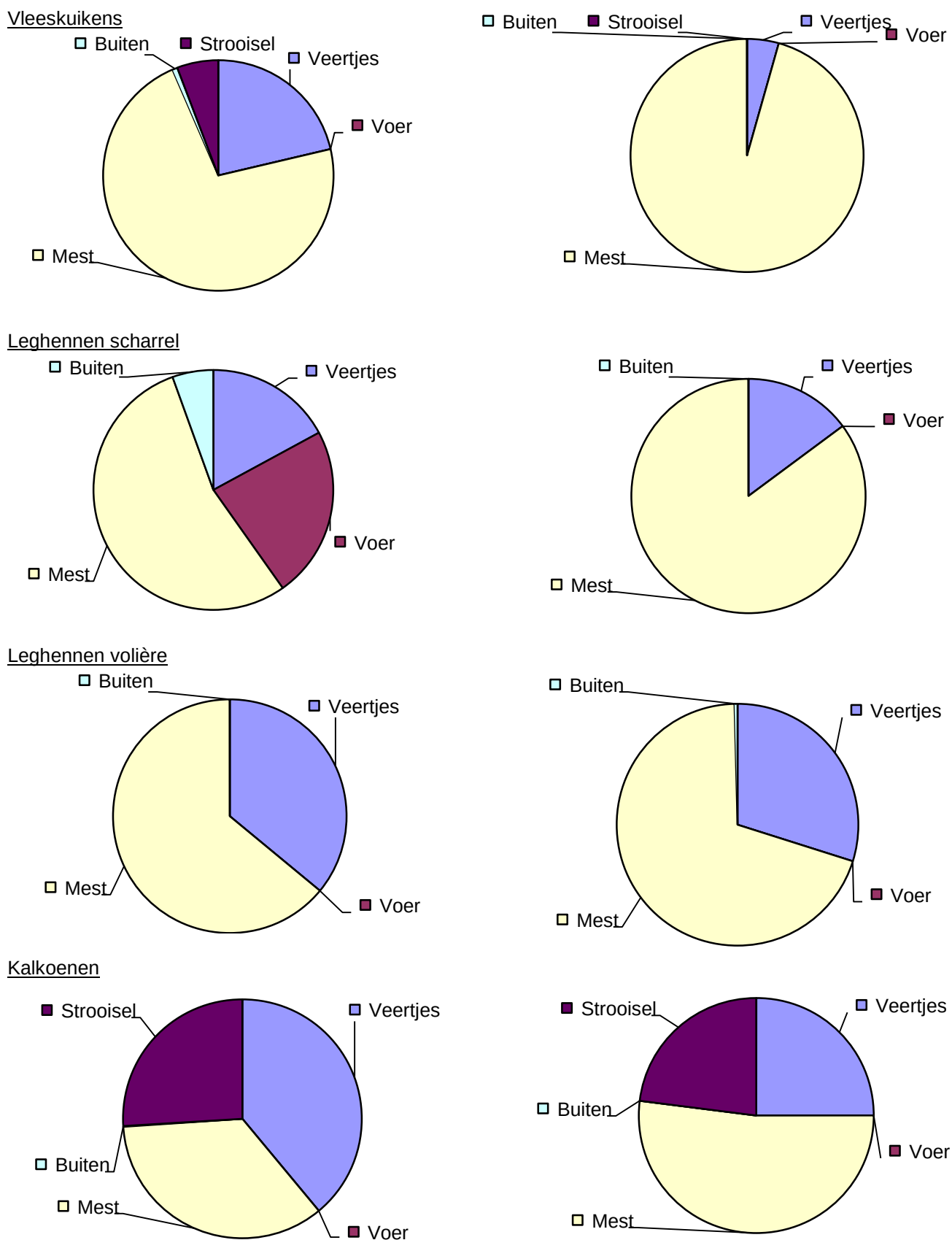
Guste en drachtige zeugen



Melkvee

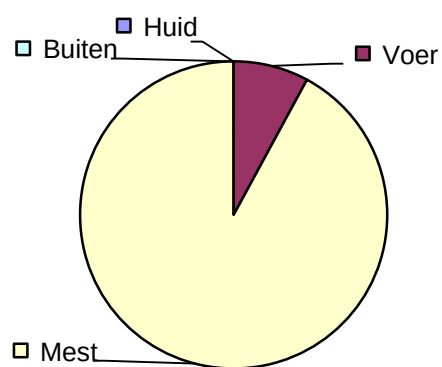
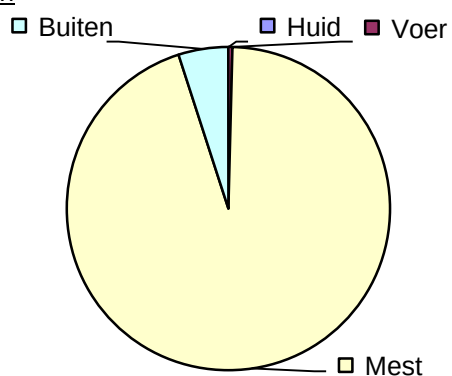


Figuur 4b Bijdrage van de verschillende bronnen aan aantal deeltjes in de lucht van varkens- en melkveestallen. Links: deeltjes < 2,5 µm; rechts: deeltjes 2,5 – 10 µm. Voer = mengvoer.

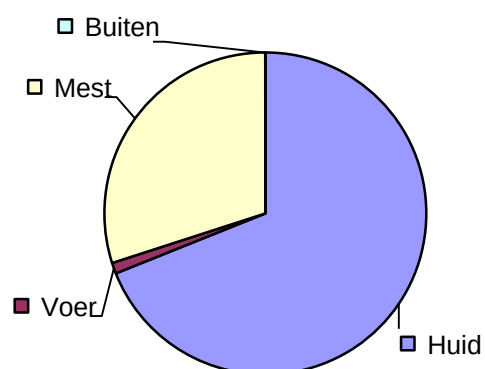
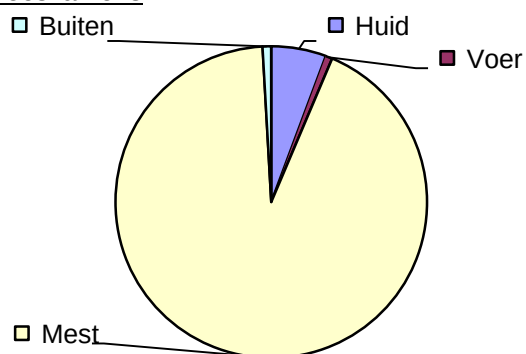


Figuur 5a Bijdrage van de verschillende bronnen aan massa van de deeltjes in de lucht van pluimveestallen. Links: deeltjes < 2,5 µm; rechts: deeltjes 2,5 – 10 µm. Voer = mengvoer.

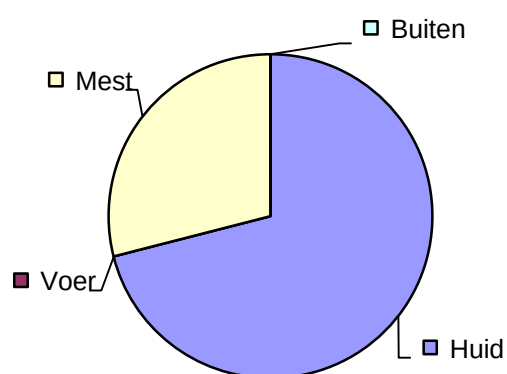
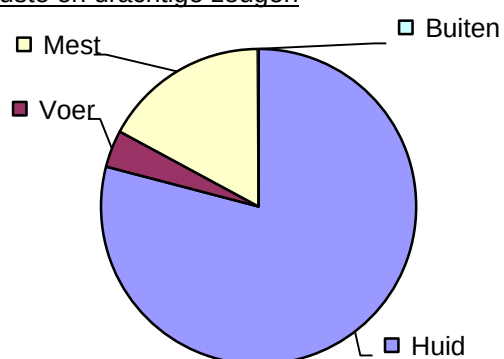
Biggen



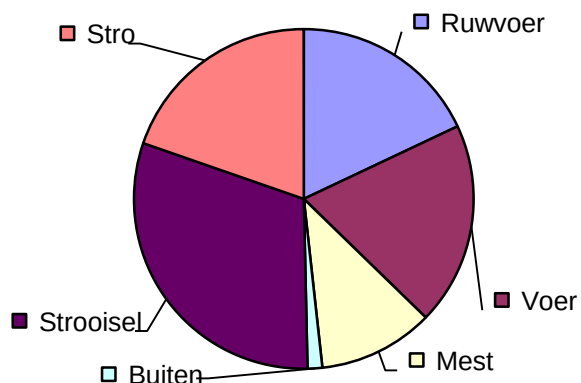
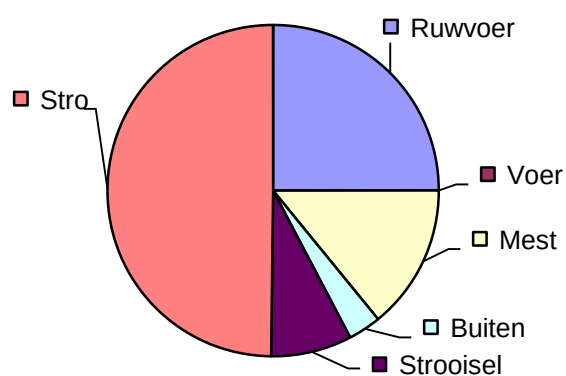
Vleesvarkens



Guste en drachtige zeugen



Melkvee



Figuur 5b Bijdrage van de verschillende bronnen aan massa van de deeltjes in de lucht van varkens- en melkveestallen. Links: deeltjes < 2,5 µm; rechts: deeltjes 2,5 – 10 µm. Voer = mengvoer; silage = ruwvoer.

Conclusies

Op basis van deze studie kunnen we de volgende conclusies trekken:

- De meeste deeltjes in stallen zijn kleiner dan 1,0 μm : gemiddeld 87,0%. Voor de buitenlucht is dit meer dan 99%.
- Gemiddeld komt meer dan de helft (52%) van de deeltjes kleiner dan 1,0 μm van buiten.
- Op basis van massa bestaat gemiddeld 97% van het stof in stallucht uit deeltjes tussen 2,5 – 32 μm : 50% in de range tussen 2,5 – 10 μm en 47% in de range 10 – 32 μm .
- Over het algemeen is het aantal en de massa van de deeltjes in alle deeltjesklassen (< 1,0 μm ; 1,0 – 2,5 μm ; 2,5 – 10 μm ; 10 – 32 μm) in pluimveestallen hoger dan in varkensstallen en in varkensstallen hoger dan in melkvee- en nertsenstallen. De aantallen deeltjes in de verschillende klassen zijn voor melkvee- en nertsenstallen vergelijkbaar en niet sterk verschillend van die van de buitenlucht.
- Hoewel het merendeel van de deeltjes kleiner is dan 2,5 μm , maken deze deeltjes slechts een klein deel uit van de totale massa.
- Bij pluimvee is het merendeel van de deeltjes < 10 μm afkomstig van mest en, in wat mindere mate, van veertjes.
- Bij varkens is ook het merendeel van de deeltjes < 10 μm afkomstig van mest. Bij vleesvarkens en gaste en drachtige zeugen is een deel van de deeltjes afkomstig van huidschilfers. Op massaniveau neemt de bijdrage van huidschilfers aan het stof in de lucht bij deze varkenscategorieën belangrijk toe. Bij biggen is de bijdrage van huidschilfers aan stof in de lucht (op basis van aantallen en massa) gering.
- Voer blijkt bij alle pluimvee- en varkenscategorieën slechts een kleine bijdrage te leveren aan het stof in de lucht.
- Bij melkvee leveren verschillende bronnen (mest, zaagsel, stro, silage/ruwvoer) een belangrijk aandeel in het aantal en massa stofdeeltjes in de stallucht. Voor de kleine deeltjes (< 2,5 μm) leveren de deeltjes die van buiten komen ook een belangrijke bijdrage aan het aantal deeltjes. Krachtvoer levert een vrij belangrijke bijdrage aan aantal en massa deeltjes van 2,5 – 10 μm .

Referenties

- Aarnink, A. J. A., Roelofs, P. F. M. M., Ellen, H. & Gunnink, H. (1999). Dust sources in animal houses. In *Proceedings Int. Symp. on Dust Control in Animal Production Facilities, 30 May - 2 June.*, 34-40 Aarhus, Denmark: Danish Institute of Agricultural Sciences, Horsens, Denmark.
- Aarnink, A. J. A., Stockhofe-Zurwieden, N. & Wagemans, M. J. M. (2004). Dust in different housing systems for growing-finishing pigs. In *Engineering the Future, AgEng conference*, session 22 Leuven, Belgium.
- Cambra-López, M., Hermosilla, T., Aarnink, A. J. A. & Ogink, N. W. M. (2011a). Selection of particle morpho-chemical characteristics to use in source apportionment of particulate matter from livestock houses. *Submitted to Journal of Aerosol Science*.
- Cambra-López, M., Hermosilla, T., Lai, H. T., Aarnink, A. J. A. & Ogink, N. W. M. (2011b). Particulate matter emitted from livestock houses: On-farm source identification and quantification. *Accepted for publication in Transactions of the ASABE*.
- Cambra-López, M., Torres, A. G., Aarnink, A. J. A. & Ogink, N. W. M. (2011c). Source analysis of fine and coarse particulate matter from livestock houses. *Atmospheric Environment* 45: 694-707.
- Council directive 1999/30/EC (1999). Council Directive 1999/30/EC of 22 April 1999 relating to limit values for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air (Ed Commission of the European Communities). Brussels: Official Journal L 163, 29/06/1999 P. 0041 - 0060.
- Council Directive 2008/50/EC (2008). Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. (Ed Commission of the European Communities). Brussels: Official Journal of the European Union L 152/1 - 152/44, 11.6.2008.
- Genstat Committee (2010). GenStat Thirteenth Edition, Version-13.2.0.4682. *VSN International Ltd, Hemel Hempstead, UK*.
- Heber, A. J., Stroik, M., Faubion, J. M. & Willard, L. H. (1988). Size distribution and identification of aerial dust particles in swine finishing buildings. *Transactions of the ASAE* 31(3): 882-887.
- Lai, H. T. L., Aarnink, A. J. A., Cambra-López, M., Huynh, T. T. T., Parmentier, H. K. & Groot Koerkamp, P. W. G. (2011). Size distribution of airborne particles in animal houses. *Submitted paper*.
- Preller, L., Heederik, D., Boleij, J. S. M., Vogelzang, P. F. J. & Tielen, M. J. M. (1995). Lung function and chronic respiratory symptoms of pig farmers: focus on exposure to endotoxins and ammonia and use of disinfectants. *Occupational and Environmental Medicine* 52: 654-660.
- Takai, H., Pedersen, S., Johnsen, J. O., Metz, J. H. M., Groot Koerkamp, P. W. G., Uenk, G. H., Phillips, V. R., Holden, M. R., Sneath, R. W., Short, J. L., White, R. P., Hartung, J., Seedorf, J., Schröder, M., Linkert, K. H. & Wathes, C. M. (1998). Concentrations and Emissions of Airborne Dust in Livestock Buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research* 70(1): 59-77.
- Zhang, Y., Tanaka, A., Dosman, J. A., Senthilselvan, A., Barber, E. M., Kirychuk, S. P., Holfeld, L. E. & Hurst, T. S. (1998). Acute respiratory responses of human subjects to air quality in a swine building. *Journal of Agricultural Engineering Research* 70(4): 367-373.
- Zhang, Y. H. (2004). *Indoor air quality engineering* Boca Raton, Florida: CRC Press.

Bijlage 1. Bijdrage bronnen aan deeltjes in stallucht**Tabel 4** Relatieve bijdrage van de verschillende bronnen aan het aantal deeltjes in stallucht, voor deeltjes kleiner dan 2,5 µm.

Bronnen	Broilers		Laying hens- floor		Laying hens- aviary		Turkeys		Piglets		Growing-finishing pigs		Dry and pregnant sows		Cattle	
	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE
Veertjes	28,4	21,5	4,4	1,1	16,0	8,7	43,2	15,3	-	-	-	-	-	-	-	-
Voer	0,0	0,0	9,6	9,6	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	2,4	0,4	0,4	0,7	0,7	0,0	-
Mest	67,7	18,2	74,2	1,8	84,0	8,7	22,9	12,8	91,2	4,0	98,3	1,7	78,9	4,1	23,7	-
Buiten	0,3	0,3	11,8	8,9	0,0	0,0	0,2	0,2	6,4	6,4	1,0	1,0	0,4	0,4	36,3	-
Huid	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0	0,0	0,4	0,4	20,0	4,4	-	-
Strooisel	3,5	3,5	-	-	-	-	33,7	2,7	-	-	-	-	-	-	5,6	-
Stro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22,6	-
Silage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,8	-
R ²	0,79 - 0,82		0,49 - 0,87		0,94 - 0,96		0,88 - 0,97		0,43 - 0,74		0,78 - 0,96		0,71 - 0,78		0,71	

Tabel 5 Relatieve bijdrage van de verschillende bronnen aan het aantal deeltjes in stallucht, voor deeltjes tussen 2,5 en 10 µm.

Bronnen	Broilers		Laying hens- floor		Laying hens- aviary		Turkeys		Piglets		Growing-finishing pigs		Dry and pregnant sows		Cattle	
	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE
Veertjes	17,2	6,8	6,3	6,3	10,2	9,9	31,7	3,2	-	-	-	-	-	-	-	-
Voer	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	6,0	4,2	4,2	0,0	-	24,4	-
Mest	82,8	6,8	93,7	6,3	87,7	7,8	35,8	1,5	94,0	6,0	84,5	1,8	85,4	-	17,7	-
Buiten	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	13,2	-
Huid	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0	0,0	11,3	2,4	14,6	-	-	-
Strooisel	0,0	0,0	-	-	-	-	32,5	1,7	-	-	-	-	-	-	22,1	-
Stro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,1	-
Silage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,6	-
R ²	0,86 - 0,97		0,88 - 0,88		0,95 - 0,96		0,86 - 0,94		0,44 - 0,61		0,76 - 0,88		0,85		0,53	



Wageningen UR Livestock Research

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

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

Tabel 6 Relatieve bijdrage van de verschillende bronnen aan de massa deeltjes in stallucht, voor deeltjes kleiner dan 2,5 µm.

Bronnen	Broilers		Laying hens- floor		Laying hens- aviary		Turkeys		Piglets		Growing-finishing pigs		Dry and pregnant sows		Cattle	
	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE
Veertjes	21,3	19,5	17	12	36	26	39	17	-	-	-	-	-	-	-	-
Voer	0	0	23	23	0	0	0	0	0,4	0	0,7	0,7	3,8	3,8	0,0	-
Mest	72,1	14,3	54	6,8	64	26	35	17	95	5	93	7,2	17	6,2	29,4	-
Buiten	0,7	0,7	5,5	4,4	0	0	0,1	0,1	5	5	0,9	0,9	0,1	0,1	2,9	-
Huid	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	5,7	5,7	79	10	-	-
Strooisel	5,8	5,8	-	-	-	-	26	0,3	-	-	-	-	-	-	8,0	-
Stro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37,0	-
Silage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22,7	-

Tabel 7 Relatieve bijdrage van de verschillende bronnen aan de massa deeltjes in stallucht, voor deeltjes tussen 2,5 en 10 µm.

Bronnen	Broilers		Laying hens- floor		Laying hens- aviary		Turkeys		Piglets		Growing-finishing pigs		Dry and pregnant sows		Cattle	
	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE	Avg	SE
Veertjes	4,4	1,7	15	15	30	29	25	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-
Voer	0	0	0	0	0	0	0	0	7,9	8	1,1	1,1	0	-	12,3	-
Mest	95,6	1,7	86	15	70	29	52	1,8	92	8	30	3,3	29	-	20,6	-
Buiten	0	0	0	0	0,4	0,4	0	0	0	0	0	0	0	-	0,9	-
Huid	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	69	4,4	71	-	-	-
Strooisel	0	0	-	-	-	-	23	1	-	-	-	-	-	-	27,0	-
Stro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22,4	-
Silage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,8	-