



---

# Emissies van endotoxinen uit de veehouderij: eindrapport endotoxine metingen

Emissions of endotoxins from animal production: final report on endotoxin measurements

A. Winkel, J.J. Erbrink, I.M. Wouters, J.H.W. Huis in 'T Veld, D.J.J. Heederik en N.W.M. Ogink



LIVESTOCK RESEARCH  
WAGENINGEN UR

---



---

# Emissies van endotoxinen uit de veehouderij: eindrapport endotoxine metingen

Emissions of endotoxins from animal production: final report on endotoxin measurements

## *Auteurs*

Dit rapport is tot stand gekomen door een multidisciplinair projectteam bestaande uit de volgende onderzoekers:

A. Winkel <sup>1</sup>, J.J. Erbrink <sup>2</sup>, I.M. Wouters <sup>3</sup>, J.W.H. Huis in 'T Veld <sup>1</sup>, D.J.J. Heederik <sup>3</sup>, N.W.M. Ogink <sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Wageningen Livestock Research, Wageningen University and Research*

<sup>2</sup> *Erbrink Stacks Consult*

<sup>3</sup> *Institute for Risk Assessment Sciences, Universiteit Utrecht*

Wageningen, december 2018

Livestock Research Rapport 1092

---

Winkel, A. en Erbrink, J.J. (eindredactie), 2018. *Emissies van endotoxinen uit de veehouderij: eindrapport endotoxine metingen = Emissions of endotoxins from animal production: final report on endotoxin measurements*. Wageningen University & Research, Wageningen Livestock Research (auteurs: A. Winkel, J.W.H. Huis in 't Veld en N.W.M. Ogink), Erbrink Stacks Consult (auteur: J.J. Erbrink), Institute for Risk Assessment Sciences, Universiteit Utrecht (auteurs: I.M. Wouters en D.J.J. Heederik). Livestock Research Rapport 1092. 66 blz.

### Synopsis

Cijfers over de emissie van endotoxinen uit stallen zijn nodig als input voor een eventueel endotoxine toetsingskader ter bescherming van de gezondheid van omwonenden van stallen. Daarnaast zijn emissiecijfers nodig in lopend onderzoek waarin concentratiegradiëntkaarten worden gegenereerd en relaties tussen gemodelleerde endotoxineconcentraties en medische gegevens van bewoners worden onderzocht. In twee eerdere rapportages is een literatuurstudie uitgevoerd (WLR Rapport 773) en is een eerste set emissiecijfers verkregen waarmee ook indicatieve verspreidingsberekeningen voor een aantal fictieve stallen zijn uitgevoerd (WLR Rapport 959). Dit derde deel van het onderzoek richtte zich op verdere onderbouwing en detaillering van de emissiecijfers en de uitgangspunten voor de verspreidingsmodellering van endotoxinen. In dit rapport is de eerste set emissiecijfers uitgebreid tot een totaal van 60 endotoxinemetingen, verricht bij een totaal van 18 stallen voor leghennen, vleeskuikens, vleesvarkens, zeugen, biggen en melkkoeien. Daarnaast bevat dit rapport twee literatuurstudies die inzichten opleveren voor het juist vormgeven van de modellering van endotoxinen vanuit stallen naar leefomgeving en omwonenden. Met dit alles is eerder ontbrekende kennis ontwikkeld dat in de toekomst kan dienen als componenten van een endotoxine toetsingskader en als een basis voor het project 'Risicomodellering veehouderij en gezondheid'.

### Abstract

Data on the emission of endotoxins from livestock farms are needed as input for a possible endotoxin assessment framework for the protection of the health of people living in the vicinity of farms. In addition, emission figures are needed in a current research project in which concentration gradient maps are generated and relationships between modelled endotoxin concentrations and residents' medical data are examined. In two previous reports, a literature study was conducted (WLR Report 773) and a first set of emission figures was obtained which were used in indicative dispersion calculations at a number of fictitious farm sites (WLR Report 959). This third part of the research focused on a further substantiation and detailing of the emission figures and the dispersion modelling of endotoxins. In this report, the first set of emission figures has been extended to a total of 60 measurements carried out at a total of 18 livestock houses for laying hens, broilers, fattening pigs, sows, piglets and dairy cows. In addition, this report contains two literature studies that provide insights for a valid design of the dispersion modelling of endotoxins from livestock farms to the environment and local residents. With all this, previously lacking knowledge has been developed which in future can serve as components of a possible endotoxin assessment framework and as input for the project 'Modelling health risks of livestock houses'.

### Omslagfoto

De foto op de voorzijde toont monsternamen van PM<sub>10</sub> in de buitenlucht met op de achtergrond een veehouderijbedrijf. Foto: Kees Rutten.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/496898> of op [www.wur.nl/livestock-research](http://www.wur.nl/livestock-research) (onder Wageningen Livestock Research publicaties).

© 2018 Wageningen Livestock Research

Postbus 338, 6700 AH Wageningen, T 0317 48 39 53, E [info.livestockresearch@wur.nl](mailto:info.livestockresearch@wur.nl),

[www.wur.nl/livestock-research](http://www.wur.nl/livestock-research). Wageningen Livestock Research is onderdeel van Wageningen University & Research. Wageningen Livestock Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke wijze dan ook zonder voorafgaande toestemming van de uitgever of auteur.



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

Wageningen Livestock Research Report 1092

---

# Inhoud

	<b>Woord vooraf</b>	<b>5</b>
	<b>Rapport in het kort: samenvatting en conclusies</b>	<b>7</b>
	<b>Lijst van afkortingen en begrippen</b>	<b>11</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>13</b>
	1.1 Probleembeschrijving en voorgeschiedenis	13
	1.2 Doelstellingen	14
	1.3 Opbouw van dit rapport	15
<b>2</b>	<b>Deelstudie A: toepasbaar maken meetmethode PM<sub>30</sub></b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>Deelstudie B: additionele metingen stof en endotoxine</b>	<b>19</b>
	3.1 Werkwijze metingen	19
	3.1.1 Diercategorieën, aantal stallocaties en aantal metingen	19
	3.1.2 Beschrijving stallen	20
	3.1.3 Gemeten variabelen	20
	3.1.4 Meetposities en meetduur	21
	3.1.5 Berekening emissies: stofemissiecijfers × endotoxinegehalten	21
	3.1.6 Statistische analyse van variantiecomponenten	21
	3.2 Resultaten metingen	23
	3.2.1 Meetomstandigheden	23
	3.2.2 Concentraties en deeltjesgrootteverdelingen van stof	23
	3.2.3 Concentraties van endotoxinen in lucht	27
	3.2.4 Gehalten van endotoxinen in stof	28
	3.2.5 Resultaten variantiecomponentenanalyse	29
<b>4</b>	<b>Deelstudie C: literatuurstudie aerodynamische eigenschappen stalstofdeeltjes</b>	<b>31</b>
	4.1 Deeltjesgrootteverdeling	31
	4.2 Morfologie en vormfactor	33
	4.3 Dichtheid (soortelijke massa)	35
	4.4 Praktische uitwerking t.b.v. dit onderzoek	36
<b>5</b>	<b>Deelstudie D: literatuurstudie maximale deeltjesgrootte in relatie tot gezondheid</b>	<b>37</b>
	5.1 Definitie van stoffracties in monsternamen conventies	37
	5.2 Deeltjesgrootte afhankelijke depositie in luchtwegen	39
	5.3 Deeltjesgroottes in endotoxine gerelateerd gezondheidseffecten onderzoek	40
	5.4 Praktische uitwerking t.b.v. dit onderzoek	41
<b>6</b>	<b>Deelstudie E: van gemeten naar verfijnde stof- en endotoxinecijfers</b>	<b>42</b>
	6.1 Achtergrond van de verfijning	42
	6.2 Verfijning verdeling stofmassa	42
	6.3 Verfijning endotoxinegehalten	43
<b>7</b>	<b>Lijst van geciteerde bronnen</b>	<b>50</b>
	<b>Bijlage A: beschrijving stallen</b>	<b>53</b>
	<b>Bijlage B: gedetailleerde beschrijving van gebruikte meetmethoden</b>	<b>55</b>

---

<b>Bijlage C: protocol weging filters en bepaling endotoxinegehalte</b>	<b>60</b>
<b>Bijlage D: correctiemethode endotoxinegehalte voor achtergrond</b>	<b>61</b>
<b>Bijlage E: omstandigheden tijdens de metingen</b>	<b>62</b>
<b>Bijlage F: scatter plots</b>	<b>63</b>
<b>Bijlage G: samenstelling klankbordgroep</b>	<b>66</b>

---

# Woord vooraf

Voor u ligt het derde rapport in de serie 'Emissies van endotoxinen uit de veehouderij'.

Deze onderzoeksopdracht is uitgevoerd binnen het kader van het Beleidsondersteunend onderzoek van het Ministerie van Economische Zaken, met financiering van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu. Het rapport is samengesteld door een team van medewerkers van Wageningen UR Livestock Research, Erbrink Stacks Consult en IRAS Universiteit Utrecht.

Onze dank gaat uit naar de 18 veehouders die hun stallen openstelden voor het doen van metingen. Dankzij de meetgegevens die we bij hen konden verzamelen hebben we de stand van kennis rondom de emissie en verspreiding van stof en het endotoxine in het stof naar de omgeving belangrijk kunnen vergroten.

Bij de samenstelling van het rapport is het projectteam ondersteund door een klankbordgroep met vertegenwoordigers van bij de problematiek betrokken maatschappelijke partijen (Bijlage G bij dit rapport). Dank aan de leden van de klankbordgroep voor hun inbreng en het projectteam voor de samenwerking.

dr.ir. A. (Albert) Winkel  
Wageningen Livestock Research





---

# Rapport in het kort: samenvatting en conclusies

## Probleembeschrijving en aanleiding

In sommige regio's in Nederland bestaat maatschappelijke ongerustheid over mogelijke gezondheidsrisico's van veehouderijemissies voor omwonenden. In twee Nederlandse studies, het onderzoek Intensieve Veehouderij en Gezondheid (IVG) en Veehouderij en Gezondheid Omwonenden (VGO), zijn een aantal associaties gevonden tussen het wonen nabij stallen en de gezondheid die wijzen op nadelige en beschermende effecten. Bij sommige van de ongunstige effecten op de gezondheid, zoals voor het verhoogd voorkomen van longontsteking nabij pluimveebedrijven, speelt de blootstelling aan stofdeeltjes en zogenaamde endotoxinen (celwandfragmenten van afgestorven Gram-negatieve bacteriën) uit stallen mogelijk een rol. In 2012 heeft de Gezondheidsraad een gezondheidskundige grenswaarde voor de algemene bevolking voorgesteld van 30 EU/m<sup>3</sup> (EU; 'endotoxine units'). Met het beschikbaar komen van een gezondheidskundige grenswaarde voor endotoxinen is een eerste basis ontstaan voor het ontwikkelen van een kwantitatief toetsingskader voor emissies van endotoxinen uit de veehouderij, zoals deze reeds bestaan voor ammoniak, fijn stof en geur. In een dergelijk toetsingskader wordt de mate van uitstoot van luchtvervuiling (emissiefactor) gekoppeld aan een verspreidingsmodel welke de blootstelling in de omgeving bepaald door een op te richten, te wijzigen of uit te breiden stal waarna deze blootstelling getoetst wordt aan de grenswaarde. De rijksoverheid heeft een consortium van Wageningen Livestock Research, IRAS-Universiteit Utrecht en Erbrink Stacks Consult gevraagd onderzoek te doen naar de ontwikkeling van een dergelijk toetsingskader voor endotoxine-emissies uit stallen. In 2014 is uit het eerste deel van dit onderzoek een literatuurstudie gepubliceerd (Winkel et al., WLR Rapport 773) dat de stand van kennis samenvatte rondom endotoxine-emissies uit stallen en mogelijkheden voor een toetsingskader verkende. In 2016 is uit het tweede deel van dit onderzoek (Ogink et al., WLR Rapport 959) een eerste set emissiecijfers verkregen door endotoxine-metingen uit te voeren bij stallen voor leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens en is een verspreidingsmodel voor endotoxinen geschikt gemaakt waarmee verkennende verspreidingsberekeningen rond enkele stalbronnen met verschillende emissiekenmerken zijn uitgevoerd. Uit de verspreidingsberekeningen met de emissiecijfers en het verspreidingsmodel bleek dat de huidige toetsingskaders voor fijn stof en geur voor pluimveebedrijven (vleeskuikens en leghennen) niet voldoende beschermend zijn tegen het overschrijden van de voorgestelde endotoxine grenswaarde (30 EU/m<sup>3</sup>). Uit de studie werd aanbevolen de eerste set emissiecijfers uit te breiden met aanvullende metingen: zowel voor reeds betrokken diercategorieën (leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens) als voor andere belangrijke diercategorieën, zoals bijvoorbeeld zeugen, biggen en melkkoeien. Omdat uit de metingen bleek dat het endotoxinegehalte in het stof toenam met de deeltjesgrootte werd verder aanbevolen een meetmethode te ontwikkelen voor een deeltjesfractie tussen PM<sub>10</sub> en PM<sub>100</sub> (bijvoorbeeld PM<sub>30</sub>) om in dit traject het endotoxinegehalte in deze grotere deeltjes nauwkeuriger te kunnen differentiëren.

Het onderhavige rapport is een vervolg op de eerdere twee rapportages uit deze serie. Dit derde deel van het onderzoek richt zich op verdere onderbouwing en detaillering van de emissiecijfers en de uitgangspunten voor de verspreidingsmodellering binnen het toetsingskader voor endotoxinen. Daarmee heeft dit rapport een sterk technisch karakter.

Lopende dit onderzoek is tevens een onderzoeksproject opgestart met de titel 'Risicomodellering veehouderij en gezondheid' (RVG). In dat project wordt de verspreiding van stof en endotoxine uit stallen op regionale schaal gemodelleerd voor een geheel studiegebied waarbij concentratiegradiëntkaarten van endotoxine worden gegenereerd en blootstelling-gezondheidseffect relaties worden onderzocht door gemodelleerde blootstellingen voor woonadressen te koppelen aan medische gegevens die als onderdeel van de VGO studie zijn verzameld. In het RVG-project zal gebruik gemaakt worden van de endotoxine-emissies die binnen het onderhavige onderzoek zijn

---

bepaald. Daarmee vormt dit rapport tevens een basis voor het RVG-project. De rapportage van het RVG project is in de loop van 2018 te verwachten.

### **Deelstudies: doel, kernresultaten en conclusies**

De verdere onderbouwing en detaillering van het endotoxine toetsingskader in dit onderzoek is uitgewerkt in vijf deelstudies (hoofdstukken 2 t/m 6). De kernresultaten en conclusies uit deze deelstudies worden hierna samengevat.

#### *Deelstudie A: toepasbaar maken meetmethode PM<sub>30</sub>*

In het voorgaande deel van dit onderzoek is gebleken dat het endotoxinegehalte in stalstof hoger is in de deeltjes van 10 tot 100 µm dan in de deeltjes kleiner dan 10 µm. Om het verloop van het endotoxinegehalte in de deeltjes tussen 10 en 100 µm nauwkeuriger te kunnen differentiëren was de eerste doelstelling van dit onderzoek een aanvullende bemonsteringsmethode voor deeltjes tot circa 30 µm (PM<sub>30</sub>) toepasbaar te maken. In de deelstudie wordt beschreven op welke manier deze methode tot stand is gekomen en hoe de methode technisch functioneert. De methode is ingezet in Deelstudie B.

#### *Deelstudie B: additionele metingen stof en endotoxinen*

In het voorgaande deel van dit onderzoek zijn metingen van stof (PM<sub>100</sub>, PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub>) en de endotoxinen daarin uitgevoerd aan zes stallen voor leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens. De tweede doelstelling van dit onderzoek was het d.m.v. metingen in stallen bepalen van representatieve broncijfers t.a.v. stofconcentraties (PM<sub>100</sub>, PM<sub>30</sub>, PM<sub>10</sub>) en het daarin aanwezige endotoxine (EU/mg stof, EU/m<sup>3</sup> lucht) voor een aantal extra stallen voor leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens, alsook voor stallen voor zeugen, biggen en melkkoeien. Deze broncijfers zijn nodig om de endotoxine-emissies te kunnen vaststellen voor deze zes diercategorieën die samen het overgrote deel van de stallen en dieren in de Nederlandse veehouderij representeren. In totaal zijn hiermee data verkregen van 60 metingen bij 18 stallen. De metingen bevestigen dat het endotoxinegehalte in het stof toeneemt met de deeltjesgrootte: grotere deeltjes zijn niet alleen zwaarder maar bevatten per eenheid van massa (mg) ook meer endotoxinen. Uitzondering hierop zijn de zeer kleine PM<sub>2,5</sub> deeltjes bij leghennen en vleesvarkens. Daarnaast verschilt het endotoxinegehalte in het stof per diercategorie: het stof van de varkenscategorieën bevat meer endotoxine dan dat van de pluimveecategorieën. Het endotoxinegehalte van het stof van melkkoeien is vergelijkbaar met, of iets hogere dan, dat van pluimvee. Uit een variantiecomponentenanalyse van de meetgegevens blijkt dat de spreiding in endotoxineconcentraties in lucht groter is dan voor stofconcentraties in lucht. Voor het endotoxinegehalte in het stof ligt de spreiding 'tussen bedrijven' (uitgedrukt als variatiecoëfficiënt) in de range van 24 tot 36%, hetgeen hoger is dan gevonden in het voorgaande deel van dit onderzoek (13 tot 19%). Verder valt de forse 'binnen bedrijf' spreiding (47 tot 60%) op: ook binnen een stal kan het endotoxinegehalte in het stof fors variëren.

#### *Deelstudie C: literatuurstudie eigenschappen van stalstofdeeltjes*

In het voorgaande deel van dit onderzoek bleek de depositie van grotere, zwaardere deeltjes een grote invloed te hebben op de door het verspreidingsmodel berekende endotoxineconcentraties en overschrijdingsafstanden. De derde doelstelling van dit onderzoek was om d.m.v. literatuurstudie de aerodynamische eigenschappen van stalstofdeeltjes in kaart te brengen. Deze kennis is nodig om het verspreidingsgedrag van stofdeeltjes in de verspreidingsmodellering op de juiste manier vorm te geven. De metingen in dit onderzoek laten zien dat bij pluimvee en varkens circa 50 tot 70% van de in de lucht aanwezige stofmassa aanwezig is in de deeltjes met diameters tussen 10 en 100 µm. Dit beeld wordt in de literatuur bevestigd en is daarmee een valide uitgangspunt voor verspreidingsmodellering. In de verspreidingsmodellering is de verdeling van stofdeeltjes als lognormaal verondersteld. Ook dit beeld wordt in de literatuur bevestigd. De metingen van stof en endotoxinen in dit onderzoek zijn verricht op basis van de stoffracties PM<sub>100</sub>, PM<sub>30</sub>, PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub>. Dit betreffen aerodynamische diameters in µm. De aerodynamische diameter van een bemonsterd deeltje is gelijk aan de diameter van een bolvormig deeltje met een dichtheid van 1 g/cm<sup>3</sup> dat dezelfde aerodynamische eigenschappen heeft als het bemonsterde deeltje. Uit de literatuurstudie blijkt dat stalstofdeeltjes sterk kunnen afwijken van een bolvorm en een vormfactor en dichtheid hebben groter dan 1. Deze diversiteit aan vormen en dichtheden van deeltjes maakt verspreidingsmodellering o.b.v. die eigenschappen ingewikkeld. Voor de verspreidingsmodellering, en de aerodynamische

---

eigenschappen van de deeltjes in de modellering, kan het beste worden uitgegaan van bolvormige deeltjes (vormfactor: 1) met een dichtheid van 1 zoals de deeltjes ook zijn bemonsterd. In het eventuele toetsingskader en in de RVG-studie zal de modellering op die manier vormgegeven worden.

#### *Deelstudie D: literatuurstudie maximale deeltjesgrootte in relatie tot gezondheid*

In dit onderzoek wordt uitgegaan van de verspreiding van endotoxinen uit stallen in stofdeeltjes met diameters tot 100 µm (inhaleerbaar stof). Van de inhaleerbaar stof fractie zal echter (hoogstens) een deel van de grotere stofdeeltjes de lagere luchtwegen en longblaasjes bereiken. De vierde doelstelling van het onderhavige onderzoek was het d.m.v. literatuuronderzoek vaststellen van de bovengrens van de stofdeeltjesgrootte welke bij inhalatie nog tot gezondheidseffecten kan leiden. Deze kennis is nodig om te bepalen of er redenen zijn om stofdeeltjes vanaf een bepaalde diameter buiten beschouwing te laten in het toetsingskader. In deze literatuurstudie is vooral gekeken waar in de luchtwegen deeltjes van verschillende diameters neerslaan en of er verschillen bekend zijn tussen gezondheidseffecten van geïnhalerde endotoxinen in verschillende deeltjesgroottes. Uit de studie blijkt dat er weinig informatie beschikbaar is over depositie in de luchtwegen van deeltjes groter dan 10 µm. De gegevens die voorhanden zijn suggereren dat grotere deeltjes slechts in beperkte mate in het ademhalingsorgaan (met name de lagere luchtwegen en de longen) de zullen doordringen. Gezondheidseffectenstudies voor endotoxine zijn voornamelijk uitgevoerd met inhaleerbaar stof. Vooralsnog is het daarom verstandig de verspreidingsmodellering voor een toetsingskader of voor analyses gericht op het vaststellen van relaties tussen omgevingsblootstelling en gezondheidseffecten, uit te voeren voor endotoxine in PM<sub>10</sub> en inhaleerbaar stof zoals in dit onderzoek tot nog toe gedaan.

#### *Deelstudie E: van gemeten naar verfijnde stof- en endotoxinecijfers*

Endotoxine wordt verondersteld via stof te emitteren, daarom wordt de verspreiding van endotoxinen in dit onderzoek gemodelleerd aan de hand van de verspreiding van stofdeeltjes in combinatie met het endotoxinegehalte in de stofdeeltjes. Omdat de depositie van deeltjes en het endotoxinegehalte van deeltjes beide toenemen met de deeltjesgrootte, was de vijfde doelstelling van dit onderzoek het verfijnen van de broncijfers voor elk van de zes diercategorieën (in 4 stof fracties: fracties PM<sub>100</sub>, PM<sub>30</sub>, PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub>) naar 10 deeltjesgrootteklassen met voor elke klasse een relatieve bijdrage aan de totale stofconcentratie in de ventilatielucht en een klasse-specifiek endotoxinegehalte (EU/mg stof). Deze verfijnde informatie is verkregen door gemeten cijfers t.a.v. deeltjesgrootteverdelingen, stof fracties en endotoxinegehalten (Deelstudie B) te verwerken tot gemodelleerde (bimodale, lognormale) verdelingen. Door de gemodelleerde verdelingen te fitten voor een range aan deeltjesdiameters en deze gefitte waarden weer terug te brengen tot 10 deeltjesgrootteklassen zijn relatieve bijdragen aan de totale stofconcentratie in de ventilatielucht en een klasse-specifiek endotoxinegehalte verkregen. Deze verfijnde broncijfers zijn opgenomen in Tabellen 13 en 14 in dit rapport en dienen, in combinatie met reeds bestaande emissie cijfers voor (fijn) stof, als de directe input voor de verspreidingsmodellering.

### **Doorwerking van dit rapport**

Met de resultaten uit de vijf deelstudies in dit onderzoek is een verdere onderbouwing en detaillering verkregen van de emissie en verspreiding van endotoxinen uit stallen. Het onderzoek is sterk technisch van aard. Deze technische informatie is echter uniek in zijn soort: in de wetenschappelijke literatuur is nauwelijks informatie voorhanden over de uitstoot en verspreiding van endotoxinen uit de ventilatielucht van stalgebouwen. Daarmee is in dit onderzoek eerder ontbrekende kennis ontwikkeld dat in de toekomst kan dienen als componenten van een endotoxine toetsingskader en als een basis voor het project 'Risicomodellering veehouderij en gezondheid'.



# Lijst van afkortingen en begrippen

Begrip of afkorting	Verklaring
Aerodynamische diameter	De aerodynamische diameter van een deeltje is gelijk aan de diameter van een bolvormig deeltje met een dichtheid van 1 g/cm <sup>3</sup> dat dezelfde terminale valsnelheid heeft als het deeltje in kwestie
Alveoli	Longblaasjes
$\beta_0$	Zie de formule in par. 3.1.6. Parameter in het statistisch model: het overall gemiddelde van de te verklaren variabele; een constante
Bedrijf <sub><i>j</i></sub>	Zie de formule in par. 3.1.6. Parameter in het statistisch model: random effect van bedrijf <i>j</i> (1, 2, ..., 18)
Vormfactor	Morfologische eigenschap van een (stof)deeltje, namelijk: de verhouding a/b waarin a de langste as door het deeltje is en b de kortste as
Big, biggen	Mannelijke en vrouwelijke varkens die zijn gespeend vanuit een kraamstal naar een biggenafdeling om daar in circa 6 weken te groeien van circa 6 naar 25 kg om vervolgens als vleesvarkens te dienen op hetzelfde bedrijf (bij een gesloten bedrijf met zowel een vermeerdering als afmesten) of op een vleesvarkensbedrijf
CO <sub>2</sub>	Koolstofdioxide
CRP	C-reactief proteïne: een acutefase-eiwit dat door de lever wordt geproduceerd en afgegeven aan de bloedbaan. Het is een maat voor de aanwezigheid van ontsteking in het lichaam
CV	Zie variatiecoëfficiënt
Deeltjesgrootteverdeling	Een gegevenstabel of figuur die aangeeft hoe groot de relatieve bijdrage van elke deeltjesgrootte (µm; doorgaans in deeltjesgrootteklassen) is ten opzichte van het totaal van de in de lucht aanwezige deeltjes. Verdelingen kunnen worden gegeven voor aantallen deeltjes of de massa van deeltjes. In dit rapport is het laatste aan de orde
Dichtheid	Zie soortelijk gewicht
Diercategorie <sub><i>k</i></sub>	Zie de formule in par. 3.1.6. Parameter in het statistisch model: fixed effect van diercategorie <i>k</i> (leghennen, vleeskuikens, zeugen, biggen, vleesvarkens, melkkoeien)
$\varepsilon_{ij}$	Zie de formule in par. 3.1.6. Parameter in het statistisch model: residuele error term; weerspiegelt de variatie van metingen (1, 2, ..., 4) genest binnen bedrijf <i>j</i>
Emissie	In algemene zin: uitstoot van een component (bijv. stof, endotoxine). In kwantitatieve zin gebruikt om de uitstootsnelheid te karakteriseren, bijvoorbeeld in mg/uur (gehele stal) of mg/uur per aanwezig dier
Emissiefactor	Uitstoot van een component zoals vastgelegd in regelgeving, uitgedrukt per tijdseenheid en eenheid van productie. Bijvoorbeeld: g/dierplaats per jaar voor PM <sub>10</sub>
Endotoxine	Deeltjes uit het buitenmembraan van Gram-negatieve bacteriën die vrijkomen wanneer de bacterie sterft en desintegreert. Bij inhalatie van zwevende endotoxinen kunnen negatieve gezondheidseffecten optreden, zowel lokaal als systemisch in het lichaam, en zowel acuut als chronisch
Endotoxineconcentratie	Concentratie van in de lucht zwevend endotoxine (als onderdeel van (fijn)stof), uitgedrukt in endotoxine units (EU)/m <sup>3</sup> lucht
Endotoxinegehalte EU	Gehalte van endotoxine in het stof, uitgedrukt in endotoxine units (EU)/mg stof Afkorting voor Endotoxine Unit (endotoxine eenheid). Betekenis: een Endotoxine Unit (EU) is een maat voor de activiteit van het endotoxine. Endotoxinen verschillen in hun biologische activiteit of potentie; de reactiviteit van een endotoxine is niet te relateren aan de massa van het endotoxine. Gewichtshoeveelheden van endotoxine zijn daarom geen goede maat voor de endotoxine activiteit. Uitdrukking van endotoxineconcentraties in EU vermijdt de problemen van de verschillende potenties van verschillende endotoxinen.
FEV1	Forced expiratory volume in 1 second: het volume geblazen in één seconde bij geforceerde expiratie vanuit volledige inspiratie

Inhaleerbaar stof	Massafractie van de in de lucht zwevende deeltjes die het ademhalingsorgaan kan penetreren: in de praktijk stofdeeltjes kleiner dan 100 µm aerodynamische diameter (ISO 7708 en EN 481)
Leghen, leghennen	Vrouwelijke kip van een specifiek legras dat vanaf 17 weken leeftijd eieren legt voor eiconsumptie
$\ln(Y_{ij})$	Zie de formule in par. 3.1.6: de natuurlijke logaritme van responsvariabele $Y$ van meting $i$ op Bedrijf $j$ van Diercategorie $k$
Lognormale verdeling	Een verzameling gegevens is lognormaal verdeeld wanneer de natuurlijke logaritmen van de gegevens normaal verdeeld zijn
$m^3$	Kubieke meter; een volume van 1 meter breed, 1 meter lang en 1 meter hoog
mg	Milligram; één duizendste gram. Gelijk aan 1000 microgram (µg)
Melkvee, melkkoeien	Vrouwelijk rund ouder dan circa 2 jaar dat gehouden wordt voor melkproductie
Middelingstijd	Het tijdsbestek waarover een gemeten waarde wordt gemiddeld. Relevantie: wanneer korte maar hoge pieken voorkomen in de emissie van stof of endotoxinen zullen deze duidelijk zichtbaar zijn in metingen met een korte middelingstijd. In metingen met een lange middelingstijd echter, zal de korte piek worden 'uitgemiddeld': de piek geeft dan nog maar een kleine verhoging van het gemiddelde. Omdat de acute gezondheidseffecten van endotoxinen reeds na enkele uren kunnen optreden zijn in dit rapport 4-uursgemiddelden gebruikt voor bijvoorbeeld concentraties van stof en endotoxine
Normale verdeling	Een verzameling gegevens is normaal verdeeld wanneer, uitgezet in een frequentiepolygoon, een klokvormige curve ontstaat die beschreven kan worden als symmetrisch rond gemiddelde $\mu$ en met een standaardafwijking $\sigma$
Optical Latex-equivalent Diameter	De optical latex-equivalent diameter van een deeltje is gelijk aan de diameter van een polystyreen latex bolletje dat dezelfde mate van lichtverstrooiing geeft als het deeltje in kwestie in een optisch meetinstrument voor stof (zoals de in dit onderzoek gebruikte GRIMM PAS model 1.109)
Pluimdaling	De gemiddelde daling van de pluim (in m) ten opzichte van een pluim die geen neerwaartse daling vertoont (zoals bij gassen)
PM	Afkorting voor Particulate Matter. Synoniem: stofdeeltjes. Betekenis: 'Mengsel van fijne vaste of vloeibare deeltjes van organische en anorganische oorsprong, zwevend in een gasvormig medium' (WHO, 2014)
PM100 of PM <sub>100</sub>	Zie inhaleerbaar stof
PM30 of PM <sub>30</sub>	Deeltjes met een aerodynamische diameter van 30 µm en kleiner
PM10 of PM <sub>10</sub>	Deeltjes met een aerodynamische diameter van 10 µm en kleiner (EN 12341)
PM2,5 of PM <sub>2,5</sub>	Deeltjes met een aerodynamische diameter van 2,5 µm en kleiner (EN 14907)
ppm	Afkorting voor 'parts per million'. Betekenis: 1 ppm is gelijk aan 0,01%. In dit rapport heeft dit betrekking op volumetrische verhoudingen
Standaardafwijking/-deviatie	Symbol: $\sigma$ . Afkorting: SD. Betekenis: een statistisch kengetal dat de mate van spreiding in een gegevensverzameling weergeeft
Soortelijk gewicht	Massa per eenheid van volume (bijv. g/cm <sup>3</sup> )
Terreinruwheid	Een lengtemaat voor de gemiddelde obstakelhoogte in het terrein (m). Parameter die wordt gebruikt in verspreidingsmodellering van een stalbron
µg	microgram, gelijk aan één duizendste milligram of één miljoenste gram
Variance	Symbol: $\sigma^2$ . Een spreidingsmaat, het kwadraat van de standaardafwijking
Variatiecoëfficiënt	Afkorting: VC. Een relatieve spreidingsmaat, namelijk: de standaardafwijking (ook wel: standaarddeviatie) uitgedrukt als percentage van het gemiddelde
VC	Zie Variatiecoëfficiënt
Vleeskuiken, vleeskuikens	Zowel mannelijke als vrouwelijke kippen van een specifiek vleesras dat in ca. 6 tot 7 weken een gewicht bereikt van ca. 2,5 kg om daarna geslacht te worden voor vleesconsumptie
Vleesvarken, vleesvarkens	Zowel mannelijke als vrouwelijke varkens die in ca. 6 maanden tijd groeien van ca. 25 kg naar ca. 115 kg om daarna geslacht te worden voor vleesconsumptie
Zeug, zeugen	Vrouwelijk varken ouder dan circa 8 maanden dat in groepshuisvesting gehouden wordt voor de productie van biggen

---

# 1 Inleiding

## 1.1 Probleembeschrijving en voorgeschiedenis

Nederland heeft een aantal regio's met zowel een hoge veedichtheid als een hoge bevolkingsdichtheid. In sommige regio's heeft dit geresulteerd in maatschappelijke ongerustheid over mogelijke gezondheidsrisico's van veehouderijbedrijven voor omwonenden. Deze ongerustheid bestaat met name over blootstelling aan stofdeeltjes, micro-organismen en endotoxinen (celwandfragmenten van Gram-negatieve bacteriën) die met de ventilatielucht van stallen worden uitgestoten (Dusseldorp et al., 2008; Kornalijnslijper et al., 2008; Maassen et al., 2012). In twee Nederlandse studies, het onderzoek Intensieve Veehouderij en Gezondheid (IVG) en Veehouderij en Gezondheid Omwonenden (VGO), worden een aantal associaties gevonden tussen het wonen nabij stallen en de gezondheid die wijzen op nadelige en beschermende effecten (Heederik et al., 2011; Maassen et al., 2016; Hagenaars et al., 2017). Onder andere werd een verhoogd risico op longontsteking gevonden tot een woonafstand van ongeveer één kilometer van pluimveebedrijven en zijn ruimtelijke en temporele effecten op de longfunctie gevonden (Borlée et al., 2007). Een mogelijke verklaring voor dergelijke verbanden is een verhoogde blootstelling aan fijnstof en endotoxinen. Daardoor kan mogelijk de samenstelling van de (populatie van) bacteriën in de longen veranderen, waardoor de gevoeligheid voor longontsteking vergroot wordt (Smit et al., 2017).

In een eerder advies aan de minister van Volksgezondheid, Welzijn en Sport concludeert de Gezondheidsraad dat studies naar relaties tussen blootstelling en gezondheidseffecten bij omwonenden van veehouderijen schaars zijn en dat de huidige stand der kennis de ontwikkeling van één kwantitatief toetsingskader t.a.v. volksgezondheidsrisico's niet toelaat (Gezondheidsraad, 2012). Wel werd als grond voor een specifiek toetsingskader voor endotoxinen een gezondheidskundige grenswaarde voor de algemene bevolking voorgesteld van 30 EU/m<sup>3</sup> (EU; 'endotoxine units'). Met het beschikbaar komen van een gezondheidskundige grenswaarde voor endotoxinen is een eerste basis ontstaan voor het ontwikkelen van een kwantitatief toetsingskader voor emissies van endotoxinen uit de veehouderij, zoals deze reeds bestaan voor ammoniak, fijn stof en geur.

Als reactie op het voornoemde advies van de Gezondheidsraad is op 14 juni 2013 een kabinetsbrief verschenen. Hierin is aangegeven dat de Staatssecretaris van Infrastructuur en Milieu de gezondheidskundige advieswaarde nader zal uitwerken en vastleggen zodat deze ter bescherming van de gezondheid van omwonenden van veehouderijen kan worden toegepast bij het verlenen van de omgevingsvergunning milieu. Naast een gezondheidskundige grenswaarde dient een toetsingskader een instrumentarium te bevatten waarmee de blootstelling in de omgeving t.g.v. veehouderijactiviteiten in kaart wordt gebracht, zodat getoetst kan worden of de grenswaarde ter hoogte van een toetsingspunt overschreden wordt. Naar analogie van het toetsingskader voor fijn stof, ammoniak en geur kan dit instrumentarium bestaan uit een verspreidingsmodel waarin emissiefactoren zijn opgenomen. In het licht van bovenstaande voorgeschiedenis is door de Rijksoverheid aan een consortium van Wageningen Livestock Research, IRAS-Universiteit Utrecht en Erbrink Stacks Consult gevraagd onderzoek te doen naar ontwikkeling van een hierboven geschetst toetsingskader voor endotoxine-emissies uit stallen.

### *Eerste rapport: literatuurstudie*

Het ontwikkelen van een dergelijk toetsingskader riep een groot aantal vragen op die beantwoording vergden alvorens tot ontwikkeling kon worden overgegaan. In een eerste deel van het onderzoek is aan de hand van deze vragen een literatuurstudie uitgevoerd welke de stand van kennis samenvat (2013-2014; Winkel et al., 2014b). De conclusie van dat rapport was dat de kennis over emissies van endotoxinen voor de Nederlandse situatie ontoereikend is om direct een toetsingskader te ontwikkelen. Verder leken oriënterende berekeningen (met een aantal noodzakelijke aannames) erop te wijzen dat huidige toetsingskaders voor fijn stof en geur niet reeds in voldoende mate bescherming bieden tegen te hoge endotoxinebelastingen, met name bij omwonenden van pluimveestallen. In het

---

rapport werd aanbevolen om brontechnische informatie te verzamelen (endotoxinegehalten in stalstof; verdeling van endotoxinen over deeltjesfracties van stof, enzovoort) en bestaande verspreidingsmodellen door te ontwikkelen middels aanpassingen voor verspreidingsberekeningen voor endotoxine.

#### *Tweede rapport: eerste set emissiefactoren en een verspreidingsmodel*

In een tweede deel van het onderzoek (2014-2016; Ogink et al., 2016) is een eerste set emissiefactoren verkregen door metingen uit te voeren van de emissie van endotoxinen uit in totaal zes stallen voor leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens. Een verspreidingsmodel voor endotoxinen is verkregen door een variant van het STACKS model hiervoor geschikt te maken. Dit betekent o.a. dat de modelvariant kan rekenen met deeltjes groter dan  $10\ \mu\text{m}$  ( $>PM_{10}$ ), met depositie van die deeltjes t.g.v. hun massa en met een endotoxinegehalte in de deeltjes. Uit de emissiemetingen bleek dat het endotoxinegehalte in het stof varieert tussen diercategorieën en toeneemt met de deeltjesgrootte. Dit betekent dat voor verspreidingsberekeningen in een toetsingskader niet kan worden volstaan met een constant endotoxinegehalte in alle stofdeeltjes maar dat onderscheid nodig is naar diercategorie en deeltjesgrootteklasse. Uit de verspreidingsberekeningen bleek dat de huidige toetsingskaders voor fijn stof en geur voor pluimveebedrijven (vleeskuikens en leghennen) niet voldoende beschermend zijn tegen het overschrijden van de gestelde endotoxine grenswaarde ( $30\ \text{EU}/\text{m}^3$ ). De berekeningen voor vleesvarkensbedrijven gaven aan dat het toetsingskader voor geur daar voldoende beschermend werkt. Deze verspreidingsberekeningen zijn gedaan voor de situatie van één bedrijf; er zijn geen situaties doorgerekend met meerdere bronnen in een relatief klein gebied waar stapeling (zogenaamde 'cumulatie') op kan treden. In een gevoeligheidsanalyse van het verspreidingsmodel zijn de effecten onderzocht van vier variabelen: depositiesnelheid (de snelheid waarmee deeltjes uit de pluim verdwijnen door sedimentatie en impactie), pluimdaling (de mate van neerwaarts/horizontaal gericht zijn van de pluimas), variatie in endotoxinegehalten in de deeltjes en de mate van terreinruwheid. Uit deze gevoeligheidsanalyse bleek met name de depositiesnelheid (en dus ook de depositie) een grote invloed te hebben op de berekende concentraties en overschrijdingsafstanden. Op basis van de studie werd aanbevolen de eerste set emissiecijfers uit te breiden met aanvullende metingen: zowel voor reeds betrokken diercategorieën (leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens) als voor andere belangrijke diercategorieën, zoals bijvoorbeeld zeugen, biggen en melkkoeien. Daarnaast werd aanbevolen om een meetmethode te ontwikkelen voor een deeltjesfractie tussen  $PM_{10}$  en  $PM_{100}$  (bijvoorbeeld  $PM_{30}$ ) om in dit traject het endotoxinegehalte in het stof nauwkeuriger te kunnen differentiëren.

## 1.2 Doelstellingen

Het onderhavige rapport is een vervolg op de eerdere twee rapportages uit deze serie (Winkel et al., 2014b; Ogink et al., 2016). Dit derde deel van het onderzoek richt zich op verdere onderbouwing en detaillering van de emissiecijfers en de uitgangspunten voor de verspreidingsmodellering binnen het toetsingskader voor endotoxinen. Daarmee heeft dit rapport een sterk technisch karakter.

In 2016 is een onderzoeksproject opgestart met de titel 'Risicomodellering veehouderij en gezondheid' (hierna: RVG). Dit project wordt uitgevoerd door een consortium van Wageningen Bioveterinary Research, IRAS Universiteit Utrecht, Erbrink Stacks Consult en Wageningen Livestock Research. Waar in het huidige project endotoxine emissiecijfers en een verspreidingsmodel zijn gegenereerd als componenten van een toetsingskader waarmee endotoxineconcentraties rondom een nieuw te vestigen, te wijzigen of uit te breiden veehouderijbedrijf inzichtelijk worden gemaakt, wordt in het RVG project de verspreiding van stof en endotoxine uit stallen gemodelleerd op regionale schaal: voor een studiegebied binnen het VGO-gebied. Daarmee worden regionale concentratiegradiëntkaarten voor endotoxine verkregen. Door deze gegevens te combineren met populatiegegevens wordt duidelijk welk deel van de populatie in het studiegebied blootgesteld is aan endotoxineconcentraties boven of onder een bepaald niveau. Door per woonadres de endotoxineblootstelling te modelleren, en deze te koppelen aan medische gegevens die als onderdeel van de VGO studie zijn verzameld, worden blootstelling-gezondheidseffect relaties onderzocht bij omwonenden met lagere blootstelling aan endotoxine dan beroepsmatig blootgestelde personen of mensen die op veehouderijbedrijven wonen. In het RVG-project worden de in het studiegebied aanwezige stalbronnen van stof en endotoxine in



---

kaart gebracht waarna broncijfers t.a.v. endotoxine-emissies nodig zijn om via het regionale verspreidingsmodel tot concentratiegradiëntkaarten en blootstellingen per woonadres te komen. In het RVG-project wordt gebruik gemaakt van de broncijfers die binnen het onderhavige onderzoek zijn bepaald. Daarmee vormt dit rapport tevens een basis voor het RVG-project.

Meer in het bijzonder kende dit onderzoek de volgende subdoelen:

1. het toepasbaar maken van een aanvullende meetmethode waarmee het endotoxinegehalte in de grotere deeltjesgrootteklassen ( $>10\ \mu\text{m}$  diameter) beter kan worden gedifferentieerd;
2. het d.m.v. metingen in stallen bepalen van representatieve broncijfers t.a.v. stofconcentraties ( $\text{PM}_{100}$ ,  $\text{PM}_{30}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ ) en het daarin aanwezige endotoxine (EU/mg stof, EU/m<sup>3</sup> lucht) voor een aantal extra stallen voor leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens, alsook voor stallen voor zeugen, biggen en melkkoeien. Deze broncijfers zijn nodig om de endotoxine-emissies te kunnen vaststellen voor deze zes diercategorieën die samen het overgrote deel van de stallen en dieren in de Nederlandse veehouderij representeren;
3. het d.m.v. literatuurstudie in kaart brengen van de aerodynamische eigenschappen van stalstofdeeltjes. Deze kennis is nodig om het verspreidingsgedrag van stofdeeltjes in de verspreidingsmodellering op de juiste manier vorm te geven;
4. het d.m.v. literatuuronderzoek vaststellen van de bovengrens van de stofdeeltjesgrootte welke bij inhalatie nog tot gezondheidseffecten kunnen leiden. Deze kennis is nodig om te bepalen of er redenen zijn om stofdeeltjes vanaf een bepaalde diameter buiten beschouwing te laten in het toetsingskader.
5. het verfijnen van de onder doelstelling 2 verkregen broncijfers voor de zes diercategorieën van 4 stoffracties naar 10 deeltjesgrootteklassen met voor elke klasse een relatieve bijdrage aan de totale stofconcentratie in de ventilatielucht ( $\text{PM}_{100}$ ) en een klasse-specifiek endotoxinegehalte (EU/mg stof). Deze verfijnde broncijfers dienen, in combinatie met reeds bestaande emissiefactoren voor stof, als de directe input voor de verspreidingsmodellering.

### 1.3 Opbouw van dit rapport

De vijf subdoelen zoals hierboven beschreven zijn uitgewerkt in vijf deelstudies (A t/m E) en weergegeven in hoofdstukken 2 t/m 6. Deze deelstudies en de conclusies daaruit zijn opgenomen in de samenvatting aan het begin van dit rapport. Om de leesbaarheid van het rapport te vergroten is ervoor gekozen een deel van de informatie in de bijlagen A t/m G bij dit rapport op te nemen.

---

## 2 Deelstudie A: toepasbaar maken meetmethode PM<sub>30</sub>

In het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016) zijn emissiemetingen uitgevoerd aan zes stallen voor leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens. Hieruit is gebleken dat het endotoxinegehalte voor alle diercategorieën hoger is in de fractie van 10 tot 100 µm dan in de fractie kleiner dan 10 µm. Om het verloop van het endotoxinegehalte in de deeltjes tussen 10 en 100 µm nauwkeuriger te kunnen differentiëren was de eerste doelstelling van dit onderzoek een aanvullende meetmethode (bemonsteringsmethode) toepasbaar te maken. In dit hoofdstuk wordt beschreven op welke manier tot deze methode is gekomen en hoe de methode technisch functioneert.

### *Inventarisatie: leveranciers meetapparatuur, literatuur en andere kennisinstellingen*

In dit onderzoek was een methode nodig die in staat is de concentratie van stofdeeltjes in lucht kleiner dan 20, 30 of 40 µm te meten waarbij ook het gehalte aan endotoxine in dat stof kan worden bepaald middels de LAL-assay (zie Bijlage D). Dit betekende dat alle methoden welke stofconcentraties kwantificeren op basis van de meetprincipes: beta-straling verzwakking, lichtverstrooiing of de oscillerende microbalans (TEOM) niet gebruikt konden worden (zie voor meer informatie over deze meetprincipes: Winkel et al., 2014a). Gezocht moest worden naar een gravimetrische meetmethode waarbij stof daadwerkelijk op een filter wordt verzameld welke voor en na bemonstering (schoon versus beladen) wordt gewogen (gravimetrie) met een zeer nauwkeurige balans onder gestandaardiseerde condities van temperatuur en luchtvochtigheid. Doorgaans zijn dit methoden die de beoogde stoffractie eerst afscheiden van de overige deeltjes via inertiële impactie (enkelvoudige impactoren of meervoudige 'cascade impactoren') of middelpuntvliedende kracht (cyclonen).

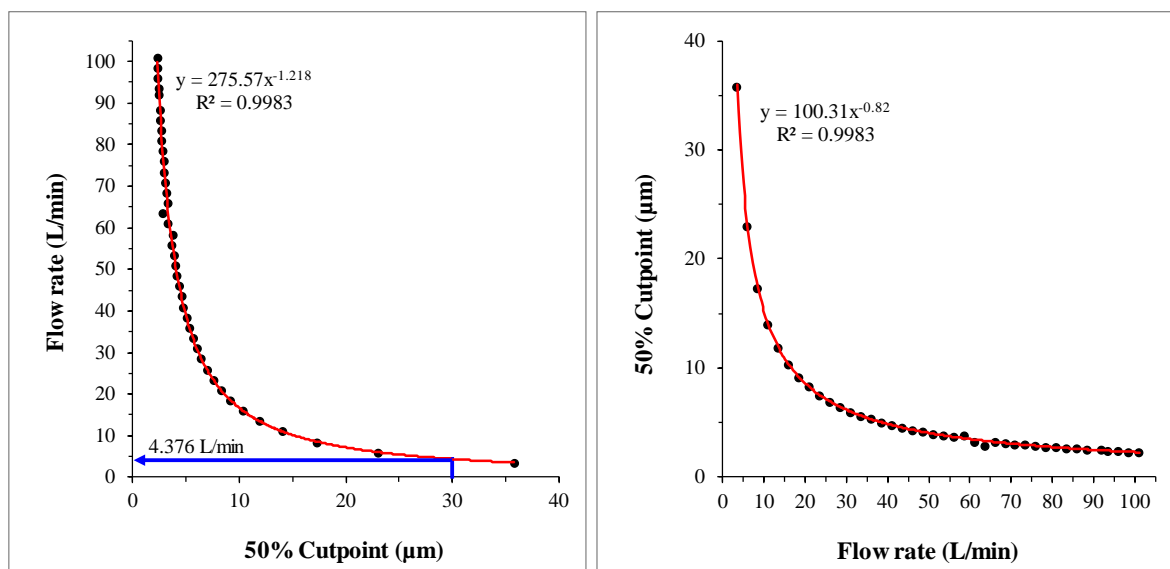
Twee op de markt verkrijgbare en in onderzoek veel gebruikte cascade impactoren zijn de Andersen cascade samplers (Thermo Scientific; vier modellen met 1, 2, 6 en 8 grootteklassen) en de MOUDI impactor (MSP Corporation; diverse modellen). De eerste kan met zijn grootste grootteklasse deeltjes van 9-10 µm en groter (>PM<sub>9</sub>) verzamelen. De tweede kan met zijn grootste stage deeltjes van 10-18 µm (PM<sub>18-10</sub>) verzamelen. Deze fracties zijn onvoldoende geschikt om het endotoxinegehalte in de deeltjes tussen 10 en 100 µm nauwkeuriger te differentiëren. In de literatuur zijn nog enkele cascade impactoren gevonden met afsnijpunten tussen 10 en 100 µm. Het betroffen echter experimentele methoden die door onderzoeksinstellingen zelf waren ontwikkeld voor een specifiek onderzoek en niet beschikbaar waren.

Naast de cascade impactoren bestaat er een monsternamekop voor 'Total Suspended Particles' (TSP). Deze monsternamekop is in de Verenigde Staten door de US-EPA tot 1987 gebruikt als voorloper van de huidige PM<sub>10</sub> metingen in de buitenlucht. Deze verzamelt deeltjes 'up to 25-50 µm, depending on wind speed and direction' (40 CFR 50, Appendix B). Algemeen wordt aangenomen dat het 50% afsnijpunt van deze voorafscheider rond 35 µm aerodynamische diameter zit (PM<sub>35</sub>). Echter: dit is nooit empirisch vastgesteld waarmee de werkelijke eigenschappen van deze monsternamekop onzeker zijn. Er zijn daarmee geen 'of the shelf' bemonsteringsmethoden gevonden met geschikte en empirisch vastgestelde afsnijpunten ruim boven 10 µm. Vervolgens is bij enkele andere kennisinstellingen (ECN en RIVM in Nederland, VITO in België) navraag gedaan naar opties die mogelijk waren gemist. Deze inventarisatie bevestigde echter het hierboven beschreven beeld.

### *Keuze: PM<sub>10</sub> cycloon bij lagere flow rate*

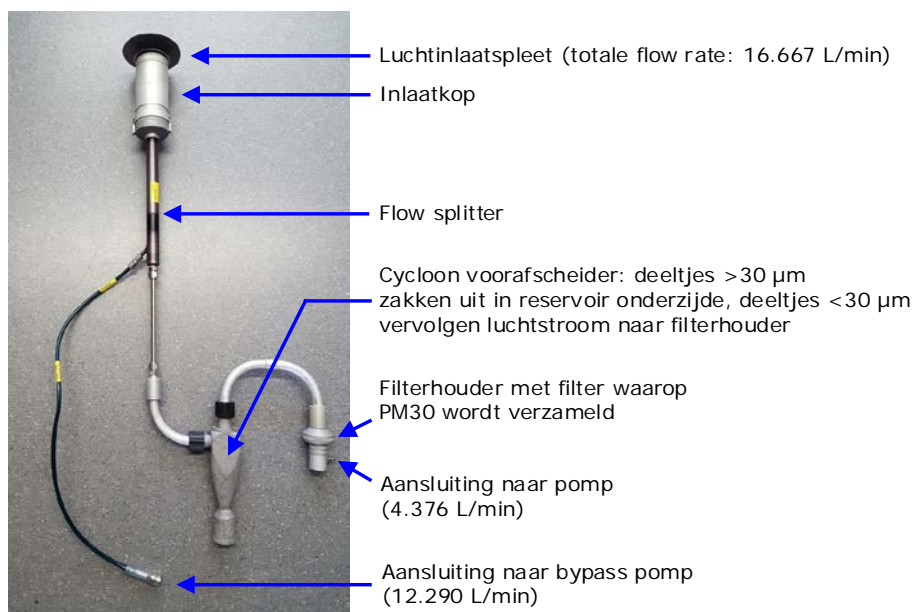
N.a.v. de hiervoor beschreven inventarisatie is gekozen gebruik te maken van de cycloon die bij Wageningen Livestock Research sinds 2007 gebruikt wordt voor het afscheiden en verzamelen van PM<sub>10</sub> (model URG-2000-30ENB; URG Corp., Chapel Hill, VS). Van deze firma is voor deze specifieke cycloon de empirisch vastgestelde relatie ontvangen tussen de flow rate (L/min) en het daarbij behorende 50% afsnijpunt (µm aerodynamische diameter). Deze relatie wordt weergegeven in Figuur 1. De cycloon is ontworpen voor een flow rate van 16,667 L/min (1 m<sup>3</sup>/h): daarbij is het 50%

afsnijpunt 10 µm. Uit de relatie in - blijkt dat door de flow rate te verlagen naar 4,376 L/min een 50% afsnijpunt bereikt kan worden van 30 µm aerodynamische diameter.



**Figuur 1**

Relatie tussen de flow rate (L/ min) door de cycloon en het 50% afsnijpunt van de aerodynamische diameter. Het 50% afsnijpunt is die aerodynamische diameter waarbij de helft van de deeltjes wordt afgevangen in de cycloon en de andere helft de luchtstroom vervolgt naar de filterhouder.



**Figuur 2**

Schematische weergave van de ontwikkelde methode om PM<sub>30</sub> stof te verzamelen op een filter. Niet op de foto staan de luchtpompen die lucht door de methode zuigen.

#### Verificatie prestaties luchtpompen bij lage flow rate

In Figuur 1 is zichtbaar dat de curve rond het niveau van 4,376 L/min relatief vlak loopt: het 50% afsnijpunt van de cycloon is in dit bereik gevoelig voor kleine afwijkingen in flow rate. Een iets grotere flow rate zal al snel resulteren in een kleiner 50% afsnijpunt, een iets kleinere flow rate zal al snel resulteren in een groter 50% afsnijpunt. Onderzocht is daarom of de beoogde luchtpompen (Tecora, model Charlie HV; Ravebo B.V., Brielle, Nederland) een flow rate van 4,376 L/min accuraat kunnen aanzuigen en stabiel kunnen handhaven. De accuraatheid van de pompen rond dit niveau is vastgesteld door de werkelijke flow rate van drie pompen gedurende circa 1 uur te meten met een gekalibreerde flow meter. De afwijkingen tussen ingestelde en werkelijke flow rate lagen in de range 0,4 tot 1,8% van de ingestelde waarde (4,376 L/min). Bij de hoogst gemeten afwijking (1,8%) naar beneden en naar boven bedraagt de flow rate respectievelijk 4,297 en 4,455 L/min en de daarbij resulterende 50% afsnijpunten 29,5 en 30,3 µm. Bij een theoretische afwijking van 5% naar beneden

---

en naar boven (een worst case scenario) bedraagt de flow rate respectievelijk 4,157 en 4,595 L/min en de daarbij resulterende 50% afsnijpunten 28,7 en 31,2  $\mu\text{m}$ . De stabiliteit van de pompen rond de ingestelde waarde wordt standaard elke seconde gemeten door de flow meter in de pomp en gelogd in het pompgeheugen. Deze tijdsvariatie wordt uitgedrukt als relatieve standaarddeviatie (variatiecoëfficiënt). Deze lagen in de range 1,8 tot 2,3% van het gemiddelde. De conclusie uit deze eerste verificatie was dat de beoogde luchtpompen het beoogde 50% afsnijpunt van 30  $\mu\text{m}$  aerodynamische diameter voldoende accuraat en stabiel kunnen realiseren .

#### *Toepassing flow splitter tussen inlaatkop en cycloon*

Zoals te zien is in Bijlage B2 en in Figuur 2 wordt de hiervoor genoemde cycloon voor verzameling van  $\text{PM}_{10}$  toegepast nadat de lucht is aangezogen door een inlaatkop. Deze inlaatkop heeft een rondlopende aanzuigspleet met daarboven een kap welke de spleet beschermt tegen regeninslag. Deze inlaat wordt voor  $\text{PM}_{10}$  beschreven in Bijlage B.1 van EN 12341. De inlaat is bedoeld voor een flow rate van 16,667 L/min (1  $\text{m}^3/\text{h}$ ).

Omdat voor het verzamelen van  $\text{PM}_{30}$  een aanzienlijk lagere flow rate wordt toegepast (4,376 L/min) mochten problemen verwacht worden bij het aanzuigen van lucht door de inlaatkop. De lagere aanzuigsnelheid nabij de aanzuigspleet zal ertoe leiden dat kleinere deeltjes nog naar binnen zullen worden gezogen terwijl grotere deeltjes hun stroomrichting zullen vervolgen en de aanzuigspleet 'missen', resulterend in een niet-representatieve bemonstering met relatief te weinig grotere deeltjes. Om dit beeld te verifiëren is tweemaal een meting uitgevoerd in een kippenstal in de dieraccommodatie Carus van Wageningen Universiteit van de stoffracties:  $\text{PM}_{100}$  (met de IOM-sampler; zie Bijlage B1) en  $\text{PM}_{10}$  (zie Bijlage B2), alsook  $\text{PM}_{20}$  (cycloon bij 7,171 L/min) en  $\text{PM}_{30}$  (cycloon bij 4,376 L/min zoals hiervoor beschreven). De  $\text{PM}_{100}$  concentraties van deze twee metingen bedroegen 15.057  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en 14.774  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  hetgeen gangbare concentraties zijn van inhaleerbaar stof in kippenstallen (Winkel et al., 2015). Het aandeel  $\text{PM}_{10}$  in  $\text{PM}_{100}$  bedroeg 0,47 en 0,53, hetgeen eveneens gangbare cijfers zijn in kippenstallen (Winkel et al., 2015). Het aandeel  $\text{PM}_{20}$  in  $\text{PM}_{100}$  en het aandeel  $\text{PM}_{30}$  in  $\text{PM}_{100}$  zouden daar boven moeten liggen. Voor  $\text{PM}_{20}$  in  $\text{PM}_{100}$  was dit nog het geval (0,57 en 0,60), voor  $\text{PM}_{30}$  echter niet (0,49 en 0,52). Conclusie uit deze twee metingen was dat de inlaat en cycloon niet op deze wijze kunnen worden ingezet bij lagere flow rates: er is een technische situatie nodig van een flow rate van 4,376 L/min door de cycloon in combinatie met een flow rate van 16,667 L/min door de inlaatkop.

Voor het toepassen van bovenstaande conclusie is een oplossing bedacht in de vorm van een flow splitter tussen de inlaatkop en de cycloon. Deze flow splitter is een standaard onderdeel van het TEOM meetinstrument waar sprake is van een vergelijkbare technische situatie: de TEOM splitst de totale flow rate van 16,667 L/min in een flow van 3,0 L/min naar het meetinstrument met daarachter een eerste pomp terwijl een bypass flow van (16,667 minus 3,0 =) 13,667 L/min wordt aangezogen (via de splitter) om het meetinstrument heen naar een tweede bypasspomp. De flow splitters kunnen volgens opgave van de fabrikant ook gebruikt worden voor het afsplitsen van de beoogde 4,376 L/min. In totaal werden drie flow splitters in bruikleen verkregen via het RIVM welke in het verleden TEOM's heeft ingezet voor metingen in het Landelijke Meetnet Luchtkwaliteit. Omdat deze splitters niet zondermeer pasten op de aansluitingen van de inlaatkop aan de ene zijde en de cycloon aan de andere zijde, zijn in de werkplaats van Wageningen Universiteit en Research speciale verloopstukken gemaakt met de daarvoor benodigde diameters, schroefdraden en moeren. De aldus verkregen opstelling wordt getoond in Figuur 2.

De combinatie van inlaatkop, flow splitter, cycloon met luchtpomp en bypasspomp is vervolgens ingezet tijdens een drietal metingen in praktijkbedrijven zodat correcte meetresultaten benut zouden kunnen worden voor het project. De resultaten daarvan lieten logische verhoudingen zien tussen  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{30}$  en  $\text{PM}_{100}$ , waarna de 'PM30 meetmethode' verder is ingezet bij de overige metingen. De resultaten hiervan worden besproken in hoofdstuk 3.

# 3 Deelstudie B: additionele metingen stof en endotoxine

In het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016) zijn metingen van stof en endotoxinen uitgevoerd aan zes stallen voor leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens. De tweede doelstelling van het onderhavige onderzoek was het d.m.v. metingen in stallen bepalen van representatieve broncijfers t.a.v. stofconcentraties (PM<sub>100</sub>, PM<sub>30</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>) en het daarin aanwezige endotoxine (EU/mg stof, EU/m<sup>3</sup> lucht) voor een aantal extra stallen voor leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens, alsook voor stallen voor zeugen, biggen en melkkoeien. Deze broncijfers zijn nodig om de endotoxine-emissies te kunnen vaststellen voor deze zes diercategorieën die samen het overgrote deel van de stallen en dieren in de Nederlandse veehouderij representeren. Dit hoofdstuk beschrijft zowel de metingen die zijn gedaan in het voorgaande rapport van Ogink et al. (2016) als in het huidige rapport. Dit hoofdstuk bestaat uit twee delen: paragraaf 3.1 vat kort samen hoe de metingen zijn uitgevoerd en verwijst verder naar bijlagen met detailinformatie. Paragraaf 3.2 beschrijft de resultaten die zijn verkregen.

## 3.1 Werkwijze metingen

### 3.1.1 Diercategorieën, aantal stallocaties en aantal metingen

In het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016) zijn metingen verricht aan twee stallen voor leghennen, twee stallen voor vleeskuikens en twee stallen voor vleesvarkens. In elke stallocatie zijn vier metingen verricht. Het totaal aantal metingen betrof (6 stallen × 4 =) 24 metingen.

In het onderhavige onderzoek zijn daaraan de diercategorieën, aantallen stallen en metingen toegevoegd zoals weergegeven in Tabel 1. In totaal bevat dit rapport nu de eindresultaten van 60 metingen in 18 stallocaties.

**Tabel 1**

*De bemeten diercategorieën, het aantal stallocaties en het aantal metingen daarbinnen, zowel in het voorgaande rapport als in het huidige rapport.*

Diercategorie	Eerste set metingen: Ogink et al. (2016) <sup>a)</sup>		Additionele metingen: dit rapport <sup>b)</sup>		Totaal: dit rapport	
	Stallen	Metingen	Stallen	Metingen	Stallen	Metingen
Leghennen	2	8	2	6	4	14
Vleeskuikens	2	8	2	6	4	14
Vleesvarkens	2	8	2	6	4	14
Zeugen	-	-	2	6	2	6
Biggen	-	-	2	6	2	6
Melkkoeien	-	-	2	6	2	6
Totaal	6	24	12	36	18	60

<sup>a)</sup> Meting zowel overdag als 's nachts (beide 4 h) in de stoffracties PM<sub>100</sub>, PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub>.

<sup>b)</sup> Metingen alleen overdag (4 h) in de stoffracties PM<sub>100</sub>, PM<sub>30</sub> en PM<sub>10</sub>.

### 3.1.2 Beschrijving stallen

In totaal zijn 60 metingen uitgevoerd in 18 stallen (Tabel 1). Een beschrijving van deze stallen is opgenomen in Bijlage A.

### 3.1.3 Gemeten variabelen

In Tabel 2 wordt een overzicht gegeven van de gemeten variabelen in het voorgaande rapport (Ogink et al., 2016) en het huidige rapport. Gedetailleerde informatie over de apparatuur en werkwijze is opgenomen in Bijlage B.

Uit Tabel 2 wordt duidelijk dat er t.o.v. de eerste set metingen (Ogink et al., 2016) enkele aanpassingen zijn gedaan aan de te meten variabelen:

- de bemonstering van PM<sub>30</sub> is toegevoegd. De reden hiervoor is beschreven in hoofdstuk 2;
- de bemonstering van PM<sub>2,5</sub> is vervallen. De reden hiervoor was dat uit de eerste set metingen bleek dat het endotoxine in deze fractie slechts circa 2% uitmaakt van het totaal in de lucht aanwezige endotoxine;
- de concentratie van CO<sub>2</sub> is bemeten met een eenvoudiger en continue meetmethode en het loggen van het ventilatiedebiet (pulsen uit een meetwaaier/klimaatcomputer) is vervallen. De reden voor beide aanpassingen was het niet langer berekenen van emissiecijfers op basis van de ventilatiedebieten tijdens de metingen maar op basis van accuratere en representatievere stofemissiecijfers in combinatie met de gehalten van endotoxine daarin zoals verkregen uit dit onderzoek.

**Tabel 2**

*Overzicht van de gemeten variabelen tijdens de metingen in het voorgaande rapport en tijdens de additionele metingen.*

Variabele (eenheid)	Eerste set metingen of Additionele metingen	Meetpositie: Ventilatielucht of Buitenlucht	Meetprincipe	Meetmethode
Concentratie PM <sub>100</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	E + A	V + B	Gravimetrie	IOM sampler met luchtpomp (2 L/min)
Concentratie PM <sub>30</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	A	V	Gravimetrie	PM10 cycloon URG-2000-30ENB met luchtpomp (3,376 L/min)
Concentratie PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	E + A	V + B	Gravimetrie	PM10 cycloon URG-2000-30ENB met luchtpomp (16,7 L/min)
Concentratie PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	E	V + B	Gravimetrie	PM2,5 cycloon URG-2000-30EG met luchtpomp (16,7 L/min)
Endotoxinen in bovenstaande fracties (EU)	E + A	V + B	Diverse	LAL-assay
Deeltjesgrootteverdeling (0,25-32 µm; #/L)	E + A	V	Lichtverstrooiing	GRIMM Portable Aerosol Spectrometer model 1.109
Concentratie CO <sub>2</sub> (ppm; verzamelmonster)	E	V	Gaschromatografie	Interscience gaschromatograaf type 8000
Concentratie CO <sub>2</sub> (ppm; continu)	A	V	IR spectrometrie	Testo meetinstrument type 435-4 met CO <sub>2</sub> -voeler
Temperatuur (°C)	E + A	V + B	Weerstandsensor	Escort iLog gecombineerde T en RV logger
Relatieve luchtvochtigheid (%)	E + A	V + B	Capacitieve sensor	Escort iLog gecombineerde T en RV logger
Ventilatiedebiet (pulsen)	E	-	Logging pulsen + omrekening naar debiet	Campell Scientific databoxen, typen CR10/CR10X/CR23/CR23X

---

### 3.1.4 Meetposities en meetduur

De variabelen in Tabel 2 zijn alle bemeten in de ventilatieluchtstroom in de stallen. Daarnaast zijn temperatuur en relatieve luchtvochtigheid ook bemeten in de buitenlucht rondom de stallen. In het voorgaande deel van dit onderzoek zijn de achtergrondconcentraties van stof en endotoxinen gemeten van de fracties PM<sub>100</sub>, PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub> buiten de stallen. Omdat de achtergrondconcentraties van stof en endotoxinen veelal minder dan 1% bedragen van de concentraties in de ventilatielucht en om zo efficiënt mogelijk om te gaan met het beschikbare onderzoeksbudget is ervoor gekozen deze achtergrondmetingen bijna geheel te laten vervallen tijdens de additionele metingen. Alleen bij de melkveestallen zijn de achtergrondconcentraties van stof en endotoxine in de fractie PM<sub>10</sub> meegemeten. De reden daarvoor is dat de binnenconcentratie in deze stallen doorgaans slechts een fractie hoger liggen dan de achtergrond. Om de stalbijdrage voldoende zuiver te kunnen bepalen was voor dit staltype een achtergrond wél belangrijk.

In het voorgaande deel van dit onderzoek zijn de metingen zowel 's nachts als overdag uitgevoerd (telkens vier uren). Omdat de emissie van stof en endotoxinen bij pluimvee en varkens overdag hoger is dan 's nachts (hogere ventilatiedebieten én hogere stofconcentraties door meer dieractiviteit) en om zo efficiënt mogelijk om te gaan met het beschikbare onderzoeksbudget is ervoor gekozen de additionele metingen bij pluimvee en varkens alleen overdag uit te voeren. Net als in het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016) bedroeg de meetduur van een meting bij leghennen, vleeskuikens, vleesvarkens, zeugen en biggen vier uren. Deze metingen werden uitgevoerd tussen circa 9:30 en 15:30 uur.

Bij melkvee bedroeg de meetduur 12-14 uren. Deze langere meetduur was nodig om voldoende stof op de filters van de stofmeetmethoden te verzamelen voor een accurate weging en bepaling van de hoeveelheid endotoxinen. Uit eerder onderzoek naar stofemissies van Nederlandse melkveestallen bleek dat concentraties in deze stallen pieken in de vroege ochtend en de late middag. In de melkveestallen werden de metingen uitgevoerd tussen 16:30 en 09:00 de volgende ochtend. In deze periode werd de melkveehouders gevraagd niet met een tractor door de stal te rijden zodat uitsluitend stalstof zou worden bemonsterd.

### 3.1.5 Berekening emissies: stofemissiecijfers × endotoxinegehalten

In het voorgaande deel van dit onderzoek zijn zowel stofconcentraties in lucht, endotoxinegehalten in het stof, endotoxineconcentraties in lucht en ventilatiedebieten bepaald. Hierdoor was het mogelijk specifieke endotoxine-emissies te bepalen voor de metingen welke ook als zodanig zijn gerapporteerd in Ogink et al. (2016). In de verspreidingsmodellering worden echter endotoxine-emissies verkregen door accurater en representatiever stofemissies (emissiecijfers uit eerder onderzoek en officiële emissiefactoren uit regelgeving) te vermenigvuldigen met het gehalte aan endotoxine in dat stof. Om deze reden zijn in dit rapport geen stof- en endotoxine-emissies meer bepaald van de specifieke metingen van dit onderzoek. Dit onderzoek richt zich op het genereren van *endotoxinegehalten*, specifiek voor stoffracties (PM<sub>100</sub>, PM<sub>30</sub>, PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub>; in de verspreidingsmodellering verder gedifferentieerd naar 10 deeltjesfracties) en diercategorieën (leghennen, vleeskuikens, vleesvarkens, zeugen, biggen en melkkoeien). In combinatie met stofemissies voor de genoemde diercategorieën worden de beoogde endotoxine-emissies verkregen. Het gehalte aan endotoxine in de genoemde stoffracties is gecorrigeerd voor de in de buitenlucht aanwezige stof en endotoxine zoals beschreven in Bijlage D. Deze correctie is nodig omdat stof en endotoxine wat reeds in de buitenlucht aanwezig is niet door de onderzochte stal wordt uitgestoten en dus moet worden afgetrokken van de concentratie gemeten in de ventilatielucht.

### 3.1.6 Statistische analyse van variantiecomponenten

De tussenbedrijfsvarianties en binnenbedrijfsvarianties voor de responsvariabelen (stofconcentraties, endotoxinegehalten in het stof en endotoxineconcentraties in de lucht) van de metingen in de stal nabij de luchtuitlaat zijn bepaald met een zogenaamd 'gemengd model' zoals weergegeven in onderstaande formule:

$$\ln(Y_{ij}) = \beta_0 + \beta_k(\text{Diercat. } k) + b_j(\text{Bedrijf } j) + \varepsilon_{ij}$$

---

Waarbij:

$\ln(Y_{ij})$  = natuurlijke logaritme van responsvariabele  $Y$  van meting  $i$  op Bedrijf  $j$

$\beta_0$  = overall gemiddelde; een constante

$\beta_k$  = fixed effect van diercategorie  $k$  (leghennen, vleeskuikens, vleesvarkens, zeugen, biggen, melkkoeien)

$b_j$  = random effect van bedrijf  $j$  (1, 2, ..., 18)

$\varepsilon_{ij}$  = residuele error term; weerspiegelt de variatie van metingen (1, 2, ..., 4) genest binnen bedrijf  $j$

De door het model bepaalde varianties voor de verschillende variantieniveaus (tussen bedrijf; binnen bedrijf) op natuurlijke logaritmische schaal zijn omgerekend naar variatiecoëfficiënten op normale schaal.



## 3.2 Resultaten metingen

### 3.2.1 Meetomstandigheden

In Bijlage E worden de resultaten weergegeven van de omstandigheden tijdens de metingen:

- de temperatuur en relatieve luchtvochtigheid binnen en buiten de stallen;
- de CO<sub>2</sub>-concentratie in de stallen;
- de achtergrondconcentraties van PM<sub>10</sub> op de dagen waarop metingen werden verricht voor het dichtstbijzijnde meetstation van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit;
- de verdeling van de metingen over het jaar en de productiecycclus van de dieren.

De verdeling van de metingen over het jaar en de productiecycclus van de dieren zijn tevens zichtbaar in de scatterplots in Bijlage F.

### 3.2.2 Concentraties en deeltjesgrootteverdelingen van stof

In Tabel 3 worden de resultaten weergegeven van de gemeten stofconcentraties in de ventilatielucht. Deze stofconcentraties zijn zeer gangbaar voor de genoemde diercategorieën zoals gepubliceerd voor Nederlandse stallen door Winkel et al. (2015).

In Tabel 4 worden de resultaten weergegeven van de verhoudingen tussen de concentraties van de verschillende stoffracties in de ventilatielucht. De PM<sub>10</sub>/PM<sub>100</sub> ratio's komen vrij goed overeen met eerder gepubliceerde gemiddelde waarden van 0,40–0,44 voor pluimvee, 0,31–0,32 voor varkens en 0,06 voor melkkoeien (Winkel et al., 2015). Uit de tabel blijkt verder dat (op basis van de massa van de deeltjes) een fors deel van het totaal in de ventilatielucht aanwezige stof groter is dan 30 µm.

Buiten de stallen werd een achtergrondconcentratie van PM<sub>10</sub> gemeten van gemiddeld 63 µg/m<sup>3</sup> voor pluimveestallen, 23 µg/m<sup>3</sup> voor varkensstallen en 11 µg/m<sup>3</sup> voor melkveestallen. In de twee melkveestallen was de PM<sub>10</sub> concentratie gemiddeld slechts 12 µg/m<sup>3</sup> hoger dan de achtergrondconcentratie, een beeld dat eerder ook bij vier Nederlandse melkveestallen werd gevonden Winkel et al. (2015).

**Tabel 3**

*Gemeten stofconcentraties in ventilatielucht in de fracties PM<sub>100</sub>, PM<sub>30</sub>, PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub>*

	PM <sub>100</sub> (µg m <sup>-3</sup> )			PM <sub>30</sub> (µg m <sup>-3</sup> )			PM <sub>10</sub> (µg m <sup>-3</sup> )			PM <sub>2,5</sub> (µg m <sup>-3</sup> )		
	<i>n</i>	Gem.	Min–Max	<i>n</i>	Gem.	Min–Max	<i>N</i>	Gem.	Min–Max	<i>n</i>	Gem.	Min–Max
<b>Overdag <sup>a)</sup></b>												
Leghennen	13	18631	10943–27341	6	10166	7700–13835	14	10186	5860–16672	8	596	315–775
Vleeskuikens	14	3061	1401–4912	6	1847	942–2434	14	1354	713–2181	8	58	41–72
Vleesvarkens	14	1732	642–5168	6	402	314–708	13	517	151–1266	8	36	12–53
Zeugen	6	856	546–1072	6	431	247–580	6	302	205–432	-	-	-
Biggen	6	2092	719–3007	6	827	138–1408	6	540	107–961	-	-	-
Melkkoeien	6	294	170–410	6	29	13–53	6	23	10–53	-	-	-
<b>'s Nachts <sup>b)</sup></b>												
Leghennen	8	1034	328–2047	-	-	-	8	409	242–650	8	25	13–39
Vleeskuikens	8	2132	571–4713	-	-	-	8	1023	264–2044	8	48	16–99
Vleesvarkens	8	1599	1005–2768	-	-	-	8	493	326–809	8	44	22–104

<sup>a)</sup> Data van het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016) + aanvullende metingen

<sup>b)</sup> Data van het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016)

**Tabel 4**

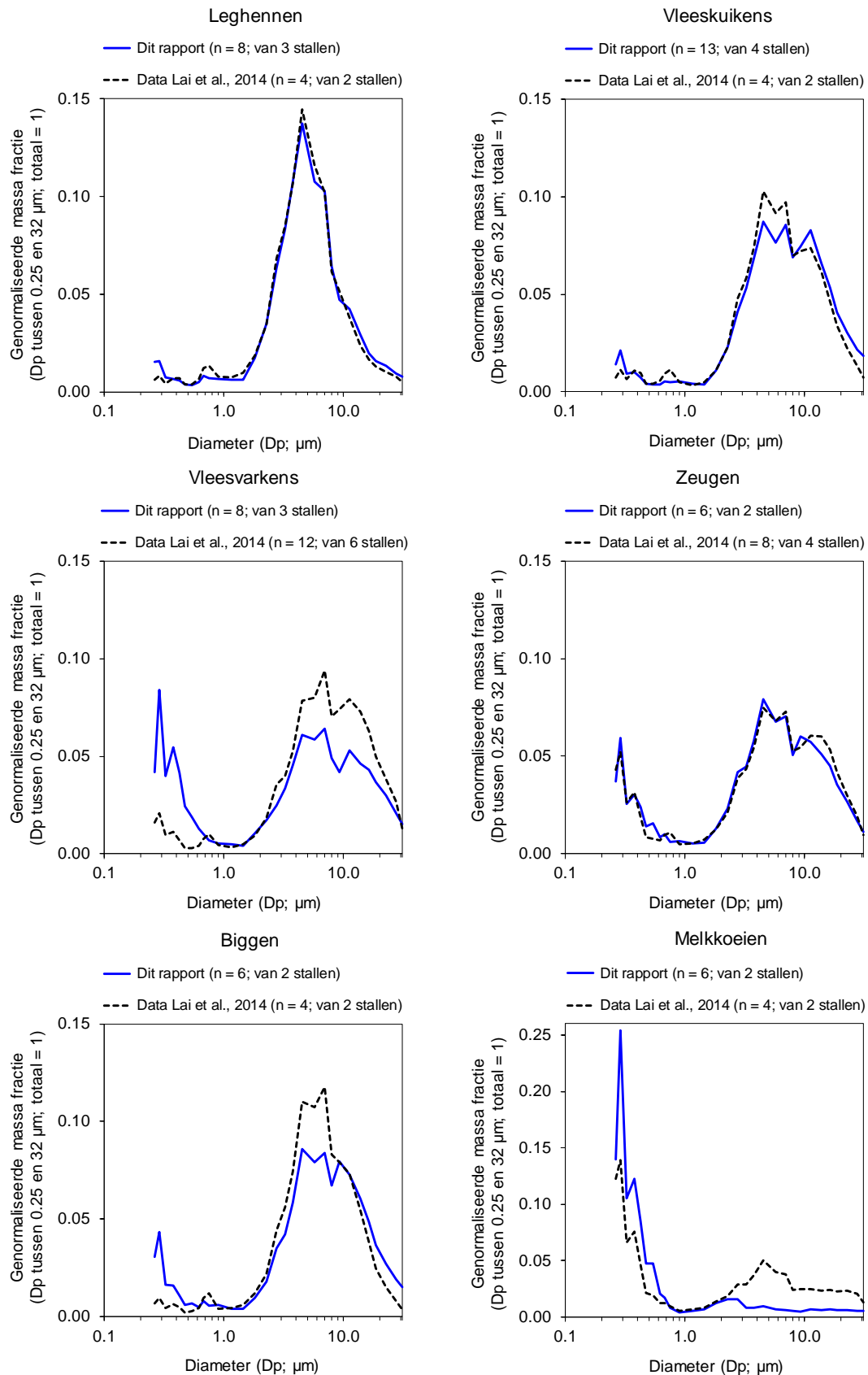
Verhoudingen tussen de concentraties van verschillende stoffracties in ventilatielucht, uitgedrukt t.o.v.  $PM_{100}$  als ratio's:  $PM_{30}/PM_{100}$ ,  $PM_{10}/PM_{100}$  en  $PM_{2,5}/PM_{100}$

	PM <sub>100</sub>	PM <sub>30</sub> / PM <sub>100</sub>			PM <sub>10</sub> / PM <sub>100</sub>			PM <sub>2,5</sub> / PM <sub>100</sub>		
	-	n	Gem.	Min–Max	n	Gem.	Min–Max	n	Gem.	Min–Max
<b>Overdag <sup>a)</sup></b>										
Leghennen	1.00	6	0.68	0.57–0.83	13	0.55	0.45–0.69	7	0.028	0.021–0.038
Vleeskuikens	1.00	6	0.55	0.48–0.67	6	0.46	0.35–0.76	8	0.022	0.015–0.030
Vleesvarkens	1.00	6	0.42	0.31–0.58	6	0.29	0.18–0.51	8	0.020	0.007–0.046
Zeugen	1.00	6	0.51	0.33–0.60	6	0.36	0.27–0.48	-	-	-
Biggen	1.00	6	0.36	0.19–0.59	6	0.24	0.15–0.33	-	-	-
Melkkoeien	1.00	6	0.11	0.05–0.26	6	0.09	0.03–0.26	-	-	-
<b>'s Nachts <sup>b)</sup></b>										
Leghennen	1.00	-	-	-	8	0.46	0.26–0.74	8	0.035	0.006–0.078
Vleeskuikens	1.00	-	-	-	8	0.49	0.43–0.59	8	0.024	0.015–0.038
Vleesvarkens	1.00	-	-	-	8	0.33	0.17–0.44	8	0.028	0.015–0.040

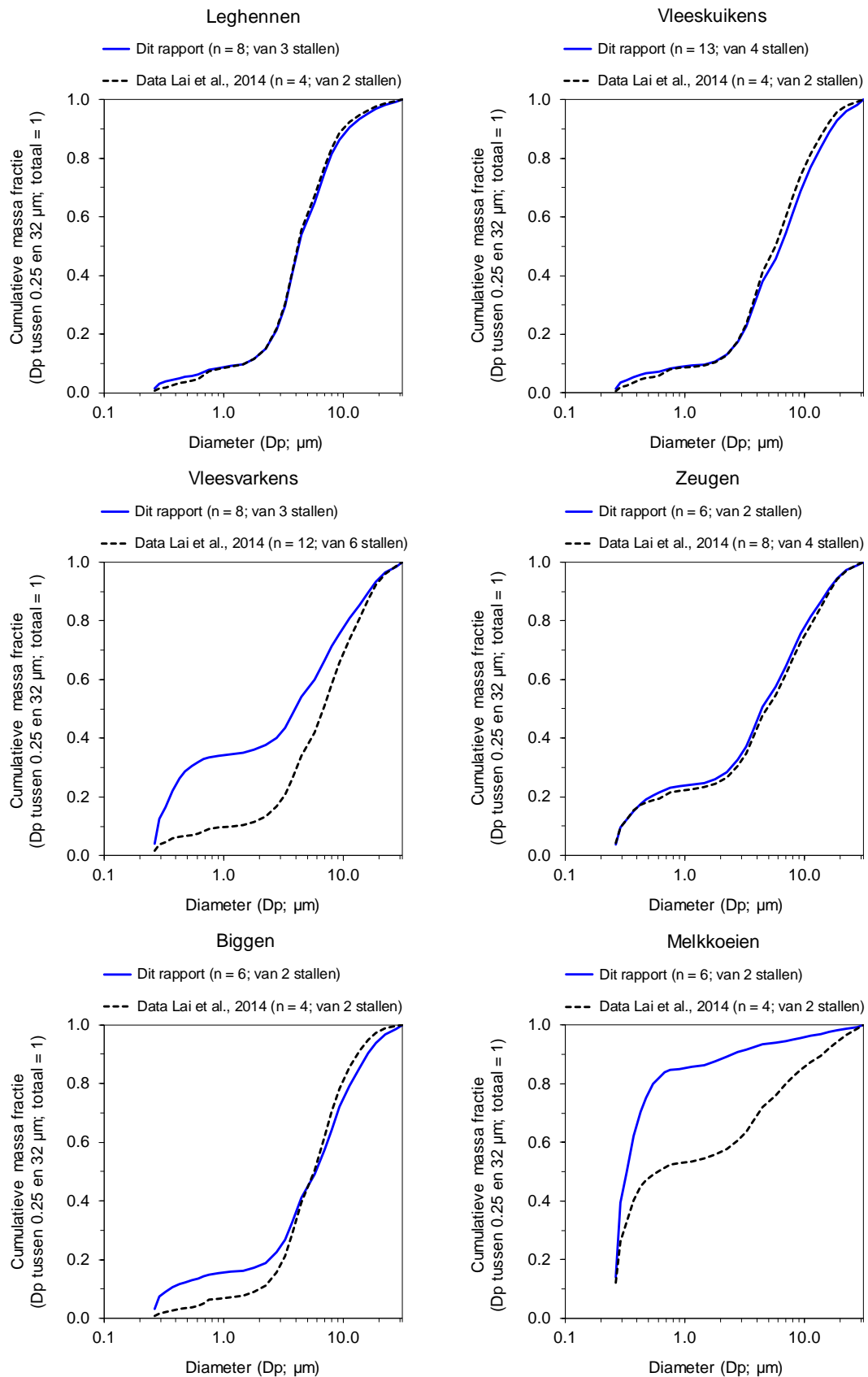
<sup>a)</sup> Data van het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016) + aanvullende metingen

<sup>b)</sup> Data van het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016)

In Figuur 3 en Figuur 4 worden de deeltjesgrootteverdelingen weergegeven zoals die gemeten zijn met de lichtverstrooiingsmeetmethode voor deeltjes tussen 0,25 en 32 µm. De zwarte stippellijnen geven tevens de deeltjesgrootteverdelingen weer zoals die enige jaren geleden zijn gemeten in Nederlandse stallen door Lai et al. (2014). Voor vleeskuikens, leghennen en zeugen geldt dat de metingen tijdens dit onderzoek zeer goed overeenkomen met de eerdere metingen door Lai et al. (2014). Voor vleesvarkens, biggen en melkkoeien wordt in het huidige onderzoek een relatief grotere bijdrage gevonden van kleine (PM<sub>1</sub>) deeltjes aan de totaal in de lucht aanwezige massa van PM<sub>32</sub>. Met name de grotere bijdrage van kleine deeltjes bij melkkoeien springt in het oog. Dit beeld wordt veroorzaakt door de grote bijdrage van de achtergrondconcentratie van PM<sub>1</sub> aan de in de stallucht aanwezige massa van PM<sub>32</sub>. Dit blijkt ook uit de resultaten van de gravimetrische metingen in Tabellen 3 en 4: de massa aan PM<sub>10</sub> in stallucht (23 µg/m<sup>3</sup>) maakt maar liefst 79% uit van de massa aan PM<sub>30</sub> in stallucht (29 µg/m<sup>3</sup>). Tussen PM<sub>30</sub> (gemiddeld 29 µg/m<sup>3</sup>) en PM<sub>100</sub> (294 µg/m<sup>3</sup>) zit vervolgens weer een substantieel deel van het totaal in de lucht aanwezig stof.



**Figuur 3**  
*Massafractie als functie van de deeltjesdiameter*



**Figuur 4**  
*Cumulative massafractie als functie van de deeltjesdiameter*

### 3.2.3 Concentraties van endotoxinen in lucht

In Tabel 5 worden de resultaten weergegeven t.a.v. de endotoxineconcentraties in de ventilatielucht. Uit de tabel blijkt dat de endotoxineconcentraties het hoogst zijn bij leghennen, gevolgd door biggen en vleesvarkens. De concentraties bij zeugen en vleeskuikens ligt een stuk onder de eerder genoemde diercategorieën. De concentraties zijn het laagste bij melkkoeien. De getoonde endotoxineconcentraties in de ventilatielucht zijn de resultante van: (1) de hoeveelheid stof in de lucht (par. 3.2.2), en (2) de hoeveelheid endotoxine in dat stof (par. 3.2.3). De lagere endotoxineconcentraties bij melkvee is te verklaren door een relatief lage stofproductie in combinatie met een groot ventilatiedebiet in deze open stallen. Voor de varkensstallen geldt dat de (t.o.v. pluimvee) lagere stofconcentraties worden gecompenseerd door een relatief hoger endotoxinegehalte in het stof.

Buiten (bovenwinds van) de stallen werd een gemiddelde (min–max) achtergrondconcentratie van endotoxinen in de PM<sub>100</sub> fractie gemeten van 45 (1,8–141) EU/m<sup>3</sup> voor pluimveestallen, 15 (1,2–119) EU/m<sup>3</sup> voor varkensstallen en 8,3 (4,0–17) EU/m<sup>3</sup> voor melkveestallen. De gemiddelde (min–max) achtergrondconcentratie van endotoxinen in de PM<sub>10</sub> fractie bedroeg 12 (0,5–41) EU/m<sup>3</sup> voor pluimveestallen, 3,4 (0,4–11) EU/m<sup>3</sup> voor varkensstallen en 1,4 (0,3–5,2) EU/m<sup>3</sup> voor melkveestallen.

**Tabel 5**

*Gemeten endotoxineconcentraties in ventilatielucht in de fracties PM<sub>100</sub>, PM<sub>30</sub>, PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub>.*

	PM <sub>100</sub> (EU m <sup>-3</sup> )			PM <sub>30</sub> (EU m <sup>-3</sup> )			PM <sub>10</sub> (EU m <sup>-3</sup> )			PM <sub>2,5</sub> (EU m <sup>-3</sup> )		
	<i>n</i>	Gem.	Min–Max	<i>n</i>	Gem.	Min–Max	<i>N</i>	Gem.	Min–Max	<i>n</i>	Gem.	Min–Max
<b>Overdag <sup>a)</sup></b>												
Leghennen	13	9058	4956–13576	6	4315	2163–5834	14	2043	454–4904	8	312	214–406
Vleeskuikens	14	2147	492–6074	6	1345	430–2975	14	582	221–1621	8	12	5.2–34
Vleesvarkens	14	5352	2302–13078	6	1294	499–2226	13	1029	283–3814	8	78	26–166
Zeugen	6	1476	523–3736	6	524	140–1026	6	355	129–648	-	-	-
Biggen	6	8569	2558–14849	6	2579	311–6217	6	1517	209–4074	-	-	-
Melkkoeien	6	247	67–481	6	11	3.1–19	6	5.1	1.6–11	-	-	-
<b>'s Nachts <sup>b)</sup></b>												
Leghennen	8	800	289–1368	-	-	-	8	170	123–263	8	9.1	6.5–13
Vleeskuikens	8	1024	196–3433	-	-	-	8	290	69–756	8	11	1.1–37
Vleesvarkens	8	4734	2385–11236	-	-	-	8	842	266–1996	8	69	16–152

<sup>a)</sup> Data van het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016) + aanvullende metingen

<sup>b)</sup> Data van het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016)

### 3.2.4 Gehalten van endotoxinen in stof

In Tabellen 6, 7 en 8 worden de resultaten weergegeven t.a.v. de endotoxinegehalten in het stof in de ventilatielucht, waarbij de gehalten in Tabel 7 zijn gecorrigeerd voor het reeds in de buitenlucht aanwezige stof en endotoxine volgens de methode beschreven in Bijlage D. Deze correctie is nodig omdat stof en endotoxine wat reeds in de buitenlucht aanwezig is niet door de onderzochte stal wordt uitgestoten en dus moet worden afgetrokken van de concentratie gemeten in de ventilatielucht. Uit deze tabellen blijken twee belangrijke aspecten:

- het endotoxinegehalte in het stof neemt toe met de deeltjesgrootte: grotere deeltjes zijn niet alleen zwaarder maar bevatten per eenheid van massa (mg) ook meer endotoxinen. Uitzondering hierop zijn de zeer kleine PM<sub>2,5</sub> deeltjes bij leghennen en vleesvarkens;
- het endotoxinegehalte in het stof verschilt per diercategorie: het stof van de varkenscategorieën bevat meer endotoxine dan dat van de pluimveecategorieën. Het endotoxinegehalte van het stof van melkkoeien is vergelijkbaar met, of iets hogere dan, dat van pluimvee.

**Tabel 6**

*Gemeten endotoxinegehalten in het stof van de fracties PM<sub>100</sub>, PM<sub>30</sub>, PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub> in ventilatielucht.*

	PM <sub>100</sub> (EU mg <sup>-1</sup> )			PM <sub>30</sub> (EU mg <sup>-1</sup> )			PM <sub>10</sub> (EU mg <sup>-1</sup> )			PM <sub>2,5</sub> (EU mg <sup>-1</sup> )		
	<i>n</i>	Gem.	Min–Max	<i>n</i>	Gem.	Min–Max	<i>n</i>	Gem.	Min–Max	<i>n</i>	Gem.	Min–Max
<b>Overdag <sup>a)</sup></b>												
Leghennen	13	504	334–907	6	421	281–570	14	217	60–634	8	542	396–747
Vleeskuikens	14	673	267–1611	6	671	277–1282	14	429	180–1072	8	203	105–499
Vleesvarkens	14	3761	1870–10949	6	3230	1461–4622	13	2105	556–4434	8	2114	715–3838
Zeugen	6	1767	896–4927	6	1419	333–4150	6	1303	497–3167	-	-	-
Biggen	6	4040	1790–6725	6	3083	1864–7538	6	2488	931–5849	-	-	-
Melkkoeien	6	788	353–1498	6	393	237–577	6	260	98–464	-	-	-
<b>'s Nachts <sup>b)</sup></b>												
Leghennen	8	902	615–1613	-	-	-	8	434	325–566	8	402	165–787
Vleeskuikens	8	418	200–1047	-	-	-	8	272	189–494	8	179	70–382
Vleesvarkens	8	3016	1283–4606	-	-	-	8	1527	760–2466	8	1506	488–2793

<sup>a)</sup> Data van het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016) + aanvullende metingen

<sup>b)</sup> Data van het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016)

**Tabel 7**

*Endotoxinegehalten in het stof van de fracties PM<sub>100</sub>, PM<sub>30</sub>, PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub> in ventilatielucht, gecorrigeerd voor de achtergrondconcentraties van stof (fracties PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub>) en het daarin aanwezige endotoxine.*

	PM <sub>100</sub> (EU mg <sup>-1</sup> )			PM <sub>30</sub> (EU mg <sup>-1</sup> )			PM <sub>10</sub> (EU mg <sup>-1</sup> )			PM <sub>2,5</sub> (EU mg <sup>-1</sup> )		
	<i>n</i>	Gem.	Min–Max	<i>n</i>	Gem.	Min–Max	<i>N</i>	Gem.	Min–Max	<i>n</i>	Gem.	Min–Max
<b>Overdag <sup>a)</sup></b>												
Leghennen	13	506	334–911	6	422	282–573	14	218	60–639	8	555	403–761
Vleeskuikens	14	680	273–1634	6	684	278–1311	14	439	182–1108	8	225	116–535
Vleesvarkens	14	3847	1881–11342	6	3428	1552–4953	13	2392	568–5016	8	3559	1120–5630
Zeugen	6	1813	918–5073	6	1515	342–4550	6	1415	528–3538	-	-	-
Biggen	6	4091	1809–6796	6	3223	1957–7746	6	2641	991–6040	-	-	-
Melkkoeien	6	815	367–1582	6	521	370–909	6	646	112–1706	-	-	-
<b>'s Nachts <sup>b)</sup></b>												
Leghennen	8	997	629–1947	-	-	-	8	519	341–959	8	1535	307–6027
Vleeskuikens	8	426	204–1047	-	-	-	8	284	190–497	8	221	97–396
Vleesvarkens	8	3064	1293–4670	-	-	-	8	1596	786–2516	8	3026	960–9639

<sup>a)</sup> Data van het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016) + aanvullende metingen

<sup>b)</sup> Data van het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016)

**Tabel 8**

Verhoudingen tussen de endotoxinegehalten in de verschillende stoffracties in stallucht, uitgedrukt t.o.v.  $PM_{100}$  als ratio's:  $PM_{30}/PM_{100}$ ,  $PM_{10}/PM_{100}$  en  $PM_{2,5}/PM_{100}$  waarbij de endotoxinegehalten zijn gecorrigeerd voor de achtergrondconcentraties van stof (fracties  $PM_{10}$  en  $PM_{2,5}$ ) en het daarin aanwezige endotoxine.

	$PM_{100}$		$PM_{30} / PM_{100}$			$PM_{10} / PM_{100}$			$PM_{2,5} / PM_{100}$		
	-		n	Gem.	Min-Max	n	Gem.	Min-Max	n	Gem.	Min-Max
<b>Overdag <sup>a)</sup></b>											
Leghennen	1.00		6	0.77	0.59–0.95	13	0.42	0.18–0.77	7	1.23	0.80–2.05
Vleeskuikens	1.00		6	0.85	0.75–1.05	14	0.73	0.34–1.14	8	0.44	0.24–0.58
Vleesvarkens	1.00		6	0.72	0.40–1.08	13	0.68	0.18–1.20	8	1.33	0.35–2.24
Zeugen	1.00		6	0.79	0.37–1.23	6	0.83	0.53–1.80	-	-	-
Biggen	1.00		6	0.83	0.34–1.14	6	0.66	0.32–0.89	-	-	-
Melkkoeien	1.00		6	0.79	0.23–1.13	6	0.74	0.31–1.29	-	-	-
<b>'s Nachts <sup>b)</sup></b>											
Leghennen	1.00		-	-	-	8	0.57	0.34–0.72	8	2.08	0.16–9.48
Vleeskuikens	1.00		-	-	-	8	0.78	0.33–1.11	8	0.57	0.31–0.90
Vleesvarkens	1.00		-	-	-	8	0.59	0.22–1.10	8	1.20	0.21–3.92

<sup>a)</sup> Data van het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016) + aanvullende metingen

<sup>b)</sup> Data van het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016)

### 3.2.5 Resultaten variantiecomponentenanalyse

Variatie is een statistische term. De variantie is een maat voor de spreiding van een reeks getallen, oftewel de mate waarin de waarden onderling verschillen. Hoe groter de variantie, hoe meer de afzonderlijke waarden onderling verschillen. Voor het toetsingskader is het belangrijk om informatie te hebben over de spreiding in emissies en concentraties binnen en tussen bedrijven. De modellering van de verspreiding gaat uit van een gemiddelde emissie, terwijl de spreiding hieromheen de uitschieters naar boven en naar beneden bepaalt. Een grotere spreiding in emissies binnen een bedrijf vertaalt zich waarschijnlijk ook in een grotere spreiding van concentraties op omgevingsniveau, wat van belang is als de overschrijding van een grenswaarde moet worden vastgesteld middels modellering (Winkel et al., 2014b). Uit studies in de werkomgeving (Spaan et al., 2008) is bekend dat de spreiding in endotoxineconcentraties meestal groter is dan voor stofconcentraties. Daarom kan dit juist voor endotoxinen meer van belang zijn. In het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016) zijn de varianties verkend door middel van een variantiecomponentenanalyse op basis van de uitgevoerde metingen (24 metingen bij 6 stallen). Deze analyse is nu herhaald op basis van de volledige dataset (60 metingen bij 18 stallen; Tabel 9).

**Tabel 9**

Variaties ( $\sigma^2$ , op natuurlijke logschaal) en variatiecoëfficiënten (VC, %) voor stofconcentratie, endotoxineconcentratie en endotoxinegehalte op twee variantieniveaus: tussen bedrijf en binnen bedrijf.

Variabele	Variantieniveau	$PM_{10}$		$PM_{30}$		$PM_{100}$	
		$\sigma^2$	VC	$\sigma^2$	VC	$\sigma^2$	VC
Stofconcentratie (mg/m <sup>3</sup> )	Tussen bedrijf	0.14	37%	0.12	34%	0.07	26%
	Binnen bedrijf	0.15	39%	0.17	41%	0.14	37%
Endotoxineconcentratie (EU/m <sup>3</sup> )	Tussen bedrijf	0.24	49%	0.33	58%	0.16	40%
	Binnen bedrijf	0.35	60%	0.36	60%	0.29	54%
Endotoxinegehalte (EU/mg)	Tussen bedrijf	0.16	39%	0.06	25%	0.08	29%
	Binnen bedrijf	0.30	55%	0.25	50%	0.22	47%
<b>Endotoxinegehalte gecorr.* (EU/mg)</b>	<b>Tussen bedrijf</b>	0.13	<b>36%</b>	0.06	<b>24%</b>	0.08	<b>29%</b>
	<b>Binnen bedrijf</b>	0.36	<b>60%</b>	0.26	<b>51%</b>	0.22	<b>47%</b>

\* Gecorrigeerd voor achtergrondconcentraties van stof en endotoxine, zie Bijlage D

---

Bij een variantiecomponentenanalyse wordt de totale variantie, dus de totale maat van spreiding, opgedeeld in deelvarianties aan de hand van bepaalde kenmerken. Deze deelvarianties geven de mate van spreiding als gevolg van deze kenmerken, bijvoorbeeld verschillen tussen bedrijven en tussen meetdagen binnen bedrijven. In het geval van concentratiemetingen in de veehouderij zal een deel van de totale spreiding in concentraties worden veroorzaakt doordat er bij verschillende bedrijven gemeten is. Dit type spreiding ('tussenbedrijfsvariantie') wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door verschillen in bedrijfsmanagement. Ook zullen metingen op verschillende dagen binnen een bepaald bedrijf resulteren in van elkaar verschillende uitkomsten ('binnenbedrijfsvariantie') als gevolg van omgevingsfactoren. De variatiecoëfficiënt is een relatieve maat voor de variantie, hierbij wordt de mate van spreiding relatief ten opzichte van het gemiddelde van de waarnemingen uitgedrukt.

In Tabel 9 zijn de variatiecoëfficiënten weergegeven voor stofconcentratie, endotoxineconcentratie en Endotoxinegehalte. Uit de tabel blijkt dat de spreiding voor endotoxineconcentraties in lucht groter is dan voor stofconcentraties in lucht. Omdat de emissie van endotoxine gemodelleerd wordt a.d.h.v. stofemissiecijfers en endotoxinegehalten daarin, focussen we hier op het laatste. De spreiding 'tussen bedrijven' ligt voor het endotoxinegehalte in het stof in de range van 24 tot 36% hetgeen hoger is dan gevonden in het voorgaande deel van dit onderzoek (13 tot 19%). Verder valt de forse 'binnen bedrijf' spreiding op: ook binnen een stal kan het endotoxinegehalte in het stof fors variëren. Een indruk van de variaties in stofconcentraties ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), endotoxineconcentraties ( $\text{EU}/\text{m}^3$ ) en endotoxinegehalten ( $\text{EU}/\text{mg}$ ) is grafisch weergegeven in de scatter plots in Bijlage F.



---

## 4 Deelstudie C: literatuurstudie aerodynamische eigenschappen stalstofdeeltjes

In het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016) is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd van de parameters in het ontwikkelde verspreidingsmodel voor endotoxinen. Hieruit bleek met name de depositiesnelheid (en dus ook de depositie) een grote invloed te hebben op de berekende concentraties en overschrijdingsafstanden. De derde doelstelling van het onderhavige onderzoek was om d.m.v. literatuurstudie de aerodynamische eigenschappen van stalstofdeeltjes in kaart te brengen. Deze kennis is nodig om het verspreidingsgedrag van stofdeeltjes in de verspreidingsmodellering op de juiste manier vorm te geven. De uitgevoerde literatuurstudie wordt in dit hoofdstuk samengevat en sluit af met de betekenis voor dit onderzoek.

### 4.1 Deeltjesgrootteverdeling

Een deeltjesgrootteverdeling is een gegevenstabel of figuur die aangeeft hoe groot de relatieve bijdrage van elke deeltjesgrootte ( $\mu\text{m}$ ; doorgaans in deeltjesgrootteklassen) is ten opzichte van het totaal van de in de lucht aanwezige deeltjes. Verdelingen kunnen worden gegeven voor *aantallen deeltjes*, voor het *volume* van deeltjes, of voor de *massa van deeltjes*. In dit rapport is het laatste aan de orde.

Een belangrijke notie bij deeltjesgrootteverdelingen is dat kleine fracties over het algemeen goed zijn gedefinieerd terwijl "het totaal van de in lucht aanwezige deeltjes" vaak minder goed is gedefinieerd. In hoofdstuk 1 (en daarin: Tabel 1) van het proefschrift van Winkel (2016) wordt een overzicht gegeven van twintig veelvoorkomende stoffracties, hun namen, definities en standaarden waarin de fracties zijn gedefinieerd. Kleine stoffracties als  $\text{PM}_{2,5}$ ,  $\text{PM}_4$  (respirabele fractie) en  $\text{PM}_{10}$  zijn goed gedefinieerd in CEN en ISO standaarden. Van de fracties die "het totaal van de in lucht aanwezige deeltjes" aanduiden is alleen inhaleerbaar stof gedefinieerd als  $\text{PM}_{100}$  (ISO 7708). De fractie 'Totaal stof' bevat "deeltjes die op een 37 mm filter cassette kunnen worden verzameld" (NIOSH methode 0500) en het 50% afsnijpunt van deze fractie is dus niet gedefinieerd. Volgens Pedersen et al. (2000) kan als vuistregel gesteld worden dat concentraties van inhaleerbaar stof circa 25% hoger zijn dan concentraties van totaal stof. De fractie 'Total Suspended Particles' (TSP) was tot 1987 in de VS de voorloper van  $\text{PM}_{10}$ . Deze fractie bevat deeltjes '*up to 25-50  $\mu\text{m}$ , depending on wind speed and direction*' (40 CFR 50, Appendix B). Wanneer in de literatuur de massaconcentratie van bijvoorbeeld  $\text{PM}_{10}$  wordt gegeven als fractie van inhaleerbaar stof, totaal stof of TSP, dan zijn deze daarom onderling moeilijk te vergelijken.

Er is internationaal vrij veel literatuur over de deeltjesgrootteverdeling van stalstof. Onderzoekers gebruikten daarbij veelal cascade-impactoren, Coulter counters of lichtverstrooiingsapparaten die deeltjes bemonsteren of tellen in een range van grootteklassen. Bij het laatste twee typen metingen zijn vaak ook massa mediaan diameters gerapporteerd. Daarnaast zijn er in diverse onderzoeken ratio's gerapporteerd tussen een kleinere fractie en een totale fractie (TSP, totaalstof, inhaleerbaar stof). Een overzicht van de meest relevante onderzoeken en hun bevindingen wordt weergegeven in Tabel 10.

**Tabel 10***Bevindingen in de literatuur t.a.v. de deeltjesgrootteverdeling van stalstof.*

Bron	Land	Diersoort	Methode	Bevindingen
Heber (1988)	US	Vleesvarkens (11 stallen)	- Totaalstof sampling - Elektronen microscopie	- 76% van aantallen deeltjes in totaalstof bestaat uit PM <sub>4</sub> . Deze fractie draagt slechts 3,7% bij aan de aanwezige massa van totaalstof - massa mediaan diameter binnen het totaalstof varieert per bedrijf tussen 15 en 26 µm
Maghirang (1997)	US	Biggen	- Totaalstof sampling - Respirabel stof sampling (PM <sub>4</sub> ) - 8-stage Andersen sampler (<21,3 µm)	- Deeltjesgrootteverdeling is lognormaal - Massa mediaan diameter: gem. 13 µm - Ratio PM <sub>4</sub> /Totaalstof: gem. 0,11
Takai (1998)	NL	Diverse	- Inh. stof sampling (PM <sub>100</sub> ) - Respirabel stof sampling (PM <sub>4</sub> )	- Ratio PM <sub>4</sub> /PM <sub>100</sub> : 0,14 (legghennen, scharrel), 0,12 (legghennen, kooi), 0,10 (vleeskuikens), 0,11 (zeugen), 0,09 (biggen), 0,09 (vleesvarkens), 0,30 (rundvee)
Schütz (2005)	DE	Vleeskalkoenen	- Inh. stof sampling (PM <sub>100</sub> ) - PM <sub>10</sub> sampling	- Ratio PM <sub>10</sub> /PM <sub>100</sub> varieert tussen 0,40 en 0,70
Hinz (2006; 2007)	DE	Vleeskalkoenen	- Totaalstof sampling - Thoracaal stof sampling (PM <sub>10</sub> )	- Ratio PM <sub>10</sub> /Totaalstof: circa 0,25–0,30
Hinz (2007)	PL	Melkkoeien, grupstal met mechanische vent.	- Totaalstof sampling - PM <sub>10</sub> sampling - Niet gedefinieerd lichtverstrooiingsapparaat	- Deeltjesgrootteverdeling is lognormaal - De modus ligt rond 30–40 µm - Circa 5–10% van de deeltjes is 100–500 µm - Ratio PM <sub>10</sub> /Totaalstof is circa 0,20 in de stal maar circa 1,00 in de ventilatorkoker in het dak
Jerez (2011)	US	Vleesvarkens	- TSP sampling - Coulter counter (3–60 µm) - Horiba LA-300 (0,1–600 µm)	- Deeltjesgrootteverdeling is redelijk normaal verdeeld - Massa mediaan diameter: gem. 23 µm
Almuhanna (2013)	SA	Legghennen, kooi	- TOPAS lichtverstrooiingsapparaat voor TSP, PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub> en PM <sub>1</sub> - GrayWolf particle counter model GW3016A (0,3–10 µm)	- Ratio PM <sub>10</sub> /TSP: 0,47 - 85% van de massa in PM <sub>10</sub> is >PM <sub>2,5</sub>
Wang-Li (2013)	US	Legghennen, kooi	- TSP sampling - Coulter counter (0,04–2000 µm)	- Massa mediaan diameter bedraagt 17–20 µm
Lai (2014); Aarnink (2011)	NL	Diverse	- GRIMM Portable Aerosol Spectrometer model 1.109 (0,25–32 µm)	- 92,5% van de deeltjes in stallucht is kleiner dan 2,5 µm. Deze talrijke, kleine en licht deeltjes dragen echter slechts 2,5% bij aan de totaal aanwezige stofmassa - 7,3 % van de deeltjes in stallucht is 2,5–10 µm. Deze deeltjes dragen 50,3% bij aan de totaal aanwezige stofmassa - 0,24 % van de deeltjes in stallucht is 10–32 µm. Deze deeltjes dragen echter 47,3 bij aan de totaal aanwezige stofmassa - Massa mediaan diameter bedraagt: 7,3–10,5 µm (pluimvee), 9,3–12,4 µm (varkens) en 11,0 µm (melkkoeien)
Schaeffer (2014; 2017)	US	Koeien	- High-volume impactor IESL v2, 4 stages: 0–3, 3–10, 10–30 en 30–100 µm - Endotoxine bepaling in stof	- Deeltjes >20 µm nauwelijks onderzocht, wel relevant - Overgrote deel stofmassa valt in de 10–100 µm stages - Deeltjesgrootteverdeling lognormaal - Endotoxinen in stof neemt toe met deeltjesgrootte
Yang (2015)	US	Diverse	- TSP sampling - Horiba LA-300 (0,1–600 µm)	- Massa mediaan diameter bedraagt 15,7–19,3 µm voor varkens (zeugen, vleesvarkens), 17,5 µm voor legghennen en 26,5 voor vleeskalkoenen
Winkel (2015)	NL	Diverse	- Inh. stof sampling (PM <sub>100</sub> ) - PM <sub>10</sub> sampling	- Ratio PM <sub>10</sub> /Inhaleerbaar stof (PM <sub>100</sub> ) bedraagt gemiddeld: 0,40 (legghennen), 0,44 (vleeskuikens), 0,32 (zeugen), 0,31 (biggen), 0,32 (vleesvarkens) en 0,06 (melkkoeien)

---

Samengevat blijkt uit de gevonden onderzoeken:

- deeltjes worden gerapporteerd tot diameters van: 21,3  $\mu\text{m}$  (Andersen sampler), 32  $\mu\text{m}$  (GRIMM PAS model 1.109), 25–50  $\mu\text{m}$  (TSP), 60  $\mu\text{m}$  (Coulter counter), 100  $\mu\text{m}$  (inhaleerbaar stof), 600  $\mu\text{m}$  (Horiba LA-300) en 2000  $\mu\text{m}$  (Coulter counter). Door de uiteenlopende meetmethoden zijn verdelingen niet altijd goed te vergelijken;
- er worden ratio's  $\text{PM}_4/\text{PM}_{100}$  gerapporteerd van circa 0,09–0,14 (pluimvee, varkens) en 0,30 (rundvee). Deze ratio's lijken vrij consistent tussen studies. Dit betekent dat bij pluimvee en varkens ruwweg 85 tot 90% van de in lucht aanwezige stofmassa zich in deeltjes bevindt groter dan 4  $\mu\text{m}$ ;
- er worden ratio's  $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{100}$  gerapporteerd van circa 0,4 bij pluimvee en ca. 0,3 bij varkens. Deze komen vrij goed overeen met de waarden van gevonden in het onderhavige onderzoek (zie Tabel 4 in hoofdstuk 3). Dit betekent dat bij pluimvee en varkens circa 50 tot 70% van de in lucht aanwezige stofmassa zich in deeltjes bevindt groter dan 10  $\mu\text{m}$ ;
- het overgrote deel van de deeltjes in stallucht is kleiner dan 2,5  $\mu\text{m}$  (~90%). Deze talrijke, kleine en lichte deeltjes dragen hooguit enkele procenten bij aan de totale massa van de deeltjes in de stallucht. Een relatief zeer klein deel van de deeltjes in stallucht is groter dan 10  $\mu\text{m}$  (<1%). Deze grote, zware deeltjes dragen echter circa 50–70% bij aan de totale massa van de deeltjes in stallucht;
- de massa mediaan diameter (de diameter waarvoor geldt dat de helft van de massa zich in kleinere deeltjes bevindt en de helft in grotere) ligt doorgaans boven 10  $\mu\text{m}$ : de literatuur noemt waarden tussen circa 7 en 26  $\mu\text{m}$ . Dit toont eveneens dat meer dan de helft van de in lucht aanwezige stofmassa uit deeltjes groter dan 10  $\mu\text{m}$  bestaat;
- deeltjesgrootteverdelingen blijken het best te kunnen worden beschreven als lognormaal.

## 4.2 Morfologie en vormfactor

Deeltjes met diameters groter dan circa 1-10  $\mu\text{m}$  beginnen gevoelig te worden voor sedimentatie: het uitzakken uit lucht t.g.v. hun massa en de daarop inwerkende zwaartekracht (Hinds et al., 1999). De massa van een deeltje wordt bepaald door de diameter (grootte; inhoud) en de soortelijke massa (massa per eenheid van inhoud; bijv.  $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Tegenovergesteld aan de neerwaartse zwaartekracht bestaat er een opwaartse wrijvingskracht die optreedt tussen het deeltje en het gasmengsel. De mate van wrijving wordt beïnvloed door de vorm van het deeltje: een bolvormig deeltje kent minder wrijving dan een deeltje met een grilliger vorm. De sedimentatie van deeltjes wordt o.a. bepaald door de netto resulterende kracht van neerwaartse zwaartekracht en opwaartse wrijvingskracht. Naast de grootte van deeltjes (par. 4.1) zijn dus soortelijke massa en vorm (morfologie) belangrijk voor het bepalen van de sedimentatiesnelheid.

### *Morfologie*

In de literatuur is een aantal studies gevonden waarin stofdeeltjes uit stallen zijn verzameld, bestudeerd met lichtmicroscopie of elektronenmicroscopie en met foto's zijn geïllustreerd. Tabel 11 geeft een overzicht van de belangrijkste bevindingen uit deze studies. Uit de tabel blijkt dat deeltjes uit stallen zeer heterogeen van vorm zijn. Deeltjes afkomstig van huid zijn veelal platte structuren: 'velletjes'. Deeltjes van haren en veren zijn vaak cilinder- of naaldvormig. Urinezuur uit de mest van pluimvee komt voor als bolletjes. Strooiseldeeltjes kunnen verschillende vormen hebben (meestal niet bolvormig) en zijn zacht/vervormbaar, gebogen en hebben scherpe randjes. Voer en mestdeeltjes zijn vaak klein, moeilijk van elkaar te onderscheiden en min of meer bol- of kubusvormig. In het algemeen wijzen de bevindingen erop dat kleinere deeltjes meer bol- of kubusvormig zijn terwijl grotere deeltjes vaker afwijkender vormen (zoals 'velletjes' of 'naalden') aannemen.

**Tabel 11**

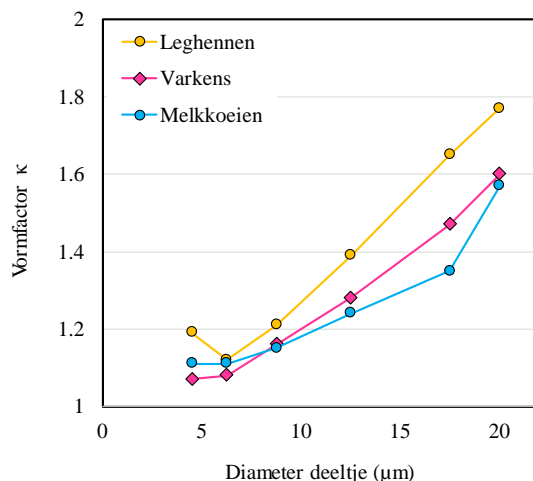
*Bevindingen uit studies waarin de morfologie van stofdeeltjes is bestudeerd met lichtmicroscopie of elektronenmicroscopie.*

Bron	Land	Diersoort	Bevindingen
Koon (1963)	US	Leghennen en vleeskuikens	- afgebroken veerbaardjes zijn cilinder-/naaldvormig, 4 µm diameter, 100 tot 130 µm lang - huidschilfertjes zijn plat, cellulaire structuur, met kleine oliedruppeltjes, diameters tussen 1 en 450 µm - beide deeltjes vormen aggregaten door elektrostatische lading
Honey (1979)	CA	Vleesvarkens	- donkere, vezelige deeltjes zijn vermoedelijk haardeeltjes - dunne, platte en witte/transparante deeltjes zijn vermoedelijk huiddeeltjes - kubusvormige of bolvormige deeltjes zijn waarschijnlijk voer- en mestdeeltjes
Feddes (1992)	CA	Vleeskalkoenen	- uit urinezuur vormen zich witte bolvormige uraten van 1 tot 12 µm - zetmeeldeeltjes lijken op uraten maar zijn iets groter: ca. 2 tot 25 µm. In vleeskalkoenenstof komt minder zetmeel voor dan bij varkens - mestdeeltjes lijken op voerdeeltjes, maar zijn kleiner en meer afgerond/geërodeerd, ca. 1 tot 40 µm
Heber (1998)	US	Vleesvarkens	- huiddeeltjes zijn plat en transparant - zetmeeldeeltjes vertonen een dubbele breking van het licht van de microscoop waardoor een donkere kern zichtbaar is - voerdeeltjes en mestdeeltjes zijn moeilijk van elkaar te onderscheiden
Nannen (2005)	DE	Vleesvarkens	Verzamelde deeltjes worden geclassificeerd in 6 vormen: perfect bolvormig, onregelmatig bolvormig, ovaal, hoekig (bijv. kegelvorm), langwerpig en vezelig
Cambra-Lopez (2011); Aarnink (2011)	NL	Vleeskuikens, leghennen, vleeskalkoenen, zeugen, biggen, vleesvarkens	- vleeskuikenstof is meer 'pluizig' van aard, waarschijnlijk door verendeeltjes - leghennenstof is meer bolvormig, waarschijnlijk veel mestdeeltjes - bij varkens zijn huiddeeltjes zichtbaar als vlakke, soms gevouwen 'velletjes' - strooiseldeeltjes zijn zacht, soms gebogen en hebben scherpe randen - melkveedeeltjes zijn groot (ruwvoer, strooisel) met kleinere mestdeeltjes
Adell (2012)	ES	Konijnen	- huiddeeltjes hebben de vorm van 'velletjes' - haardeeltjes zijn cilinder-/naaldvormig - voer-/mestdeeltjes zijn kleiner en meer bolvormig

#### *Dynamic shape factor of vormfactor*

De morfologie van deeltjes kan worden uitgedrukt in een (dimensieloze) vormfactor ( $\kappa$ ). De vormfactor geeft de verhouding aan tussen de wrijvingskracht van een niet-bolvormig deeltje en die van een bolvormig deeltje met hetzelfde volume als het niet-bolvormige deeltje. Voor een bolvormig deeltje bedraagt de vormfactor 1. Bij het berekenen van de sedimentatiesnelheid van een afwijkend deeltje wordt de dichtheid ( $\rho$ ) gedeeld door de vormfactor en daarmee gecorrigeerd voor de grotere wrijvingskracht. De uitkomst van  $\rho/\kappa$  wordt de effectieve dichtheid genoemd.

Voor zover bekend is de vormfactor voor stalstof alleen bepaald door Mostafa et al. (2016) voor stallen voor leghennen-, varkens- en melkkoeien. Volgens deze studie neemt de vormfactor toe met de deeltjesdiameter, oftewel: grotere deeltjes wijken in toenemende mate af van een bolvorm (Figuur 5). Dit is in overeenstemming met het algemene beeld uit microscopische foto's van stalstofdeeltjes (Tabel 11). De waarden wijken wel enigszins van 1 af, maar ook weer niet heel sterk.



**Figuur 5**

De vormfactor  $\kappa$  voor stalstof van leghennen, varkens en melkkoeien, zoals gerapporteerd door Mostafa et al. (2016). De figuur is samengesteld o.b.v. de data uit Tabel 1 van deze paper.

### 4.3 Dichtheid (soortelijke massa)

In de literatuur is een drietal studies gevonden die dichtheden rapporteren van stalstofdeeltjes. Tabel 12 geeft een overzicht van de belangrijkste bevindingen uit deze studies. Uit de tabel blijkt dat dichtheden van stalstof circa 1,4 tot 2,1 g/cm<sup>3</sup> bedragen.

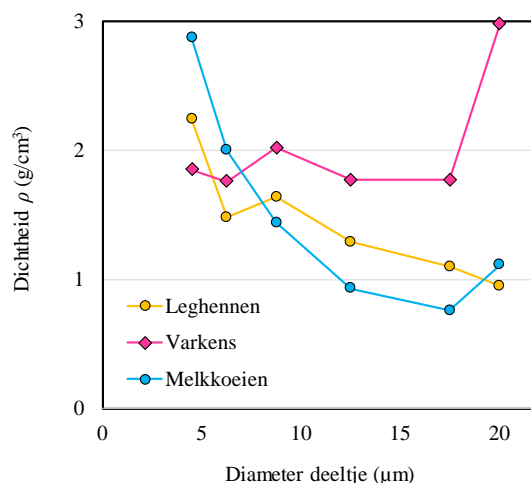
**Tabel 12**

Bevindingen uit studies waarin de dichtheid van stofdeeltjes is bepaald.

Bron	Land	Diersoort	Bevindingen
Lee (2008)	US	Diverse	- De gemiddelde dichtheden (g/cm <sup>3</sup> ) voor deeltjes in gesedimenteerd stof uit stallen bedragen 1,56 voor pluimvee, 1,58 voor varkens en 2,05 voor vleesvee
Yang (2015)	US	Diverse	- Dichtheid van stofdeeltjes varieert weinig tussen de onderzochte diercategorieën - De gemiddelde dichtheden (voor vleesvarkens, zeugen, leghennen en vleeskalkoenen en voor verschillende seizoenen) varieert van circa 1,5 tot 1,9 g/cm <sup>3</sup>
Mostafa (2016)	DE	Diverse	- Dichtheid van stofdeeltjes neemt af met de deeltjesgrootte voor leghennen en melkkoeien, niet voor vleesvarkens - De gemiddelde dichtheden (g/cm <sup>3</sup> ) voor deeltjes met diameters van 4–20 μm bedragen 1,45 voor leghennen, 2,03 voor varkens en 1,52 voor melkkoeien.

Volgens Mostafa et al. (2016) neemt de dichtheid van stof uit stallen voor leghennen en melkkoeien af met de deeltjesgrootte. De data uit deze paper is grafisch weergegeven in Figuur 6. Deze relatie is voor stof uit stallen voor varkens niet te zien: de dichtheid ligt gemiddeld hoger dan bij de andere twee diercategorieën.

In Mostafa et al. (2016), Cambra-Lopez et al. (2011) en Lai et al. (2014) worden diverse bronnen aangehaald welke richtwaarden geven voor dichtheden van relevant bronmateriaal: 0,18 (stro), 0,8–1,2 (veren), 1,1–1,4 (huid), 1,28 (maïs), 1,3 (haar), 1,5 (mest), 1,5 (houtkrullen), 1,5 (zetmeel), 2,6 (voer) en >2 (mineralen). Organische deeltjes hebben doorgaans een lagere dichtheid dan minerale deeltjes. Dichtheden van fijnstof liggen altijd hoger dan 1 g/cm<sup>3</sup>, voor stof in de atmosfeer wordt een richtwaarde van 2,1 genoemd.



**Figuur 6**

De dichtheid  $\rho$  voor stalstof van leghennen, varkens en melkkoeien, zoals gerapporteerd door Mostafa et al. (2016). De figuur is samengesteld o.b.v. de data uit Tabel 2 van deze paper.

## 4.4 Praktische uitwerking t.b.v. dit onderzoek

Uit de hiervoor beschreven stand van kennis t.a.v. aerodynamische eigenschappen van stalstofdeeltjes worden de volgende praktische uitwerkingen t.b.v. dit onderzoek gedestilleerd:

- de metingen in dit onderzoek (hoofdstuk 3) laten zien dat bij pluimvee en varkens circa 50 tot 70% van de in de lucht aanwezige stofmassa aanwezig is in de deeltjes met diameters tussen 10 en 100  $\mu\text{m}$ . Dit beeld wordt in de literatuur bevestigd en is daarmee een valide uitgangspunt voor verspreidingsmodellering;
- in de verspreidingsmodellering in het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016) zijn de deeltjes tot 30  $\mu\text{m}$  als lognormaal verdeeld verondersteld. Dit beeld wordt in de literatuur bevestigd en is daarmee een valide uitgangspunt voor verspreidingsmodellering;
- de metingen van stof en endotoxinen in dit onderzoek zijn verricht op basis van de stoffracties  $\text{PM}_{100}$ ,  $\text{PM}_{30}$ ,  $\text{PM}_{10}$  en  $\text{PM}_{2.5}$ . Het getal in deze afkorting geeft de bovengrens (50% cutpoint) aan van de deeltjesdiameter. Dit betreffen aerodynamische diameters in  $\mu\text{m}$ . De aerodynamische diameter van een bemonsterd deeltje is gelijk aan de diameter van een bolvormig deeltje met een dichtheid van 1  $\text{g}/\text{cm}^3$  dat dezelfde aerodynamische eigenschappen heeft als het bemonsterde deeltje. Dit betekent dat in dit onderzoek stofdeeltjes ongeacht hun vorm en dichtheid zijn bemonsterd: hoewel de deeltjes allerlei vormen en dichtheden hebben gekend zijn ze in een fractie bemonsterd wanneer zij dezelfde aerodynamische eigenschappen kenden als een bolvormig deeltje met een dichtheid van 1  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Uit de literatuurstudie in dit hoofdstuk blijkt dat de bemonsterde stalstofdeeltjes sterk kunnen afwijken van een bolvorm en een vormfactor en dichtheid hebben groter dan 1. Deze diversiteit aan vormen en dichtheden van deeltjes maakt verspreidingsmodellering o.b.v. die eigenschappen ingewikkeld. Voor de verspreidingsmodellering, en de aerodynamische eigenschappen van de deeltjes in de modellering, kan daarom het beste worden uitgegaan van bolvormige deeltjes met een dichtheid van 1 zoals de deeltjes ook zijn bemonsterd. Dit is dan ook de werkwijze in de verspreidingsmodellering voor endotoxinen vanuit stallen.

---

## 5 Deelstudie D: literatuurstudie maximale deeltjesgrootte in relatie tot gezondheid

Uit de metingen uitgevoerd in het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016) bleek dat de endotoxineconcentratie en het endotoxinegehalte in de inhaleerbaar stoffractie (PM<sub>100</sub>) hoger waren dan in de PM<sub>10</sub> fractie. In de verkennende verspreidingsmodellering van endotoxinen werd hiermee rekening gehouden door de verspreiding van endotoxinen in inhaleerbaar stof te modelleren. Het endotoxinegehalte in stof is hiervoor als afhankelijk gedefinieerd van de deeltjesgrootte. Er werd verondersteld dat er geen achtergrondconcentratie van endotoxinen aanwezig is. Endotoxinen in de geëmitteerde PM<sub>100</sub> fractie verspreiden zich volgens pluimverspreiding in combinatie met depositie (sedimentatie en interceptie) en pluimafdaling. Van de inhaleerbaar stoffractie zal echter (hoogstens) een deel van de grotere stofdeeltjes de lagere luchtwegen en longblaasjes (alveoli) bereiken. De vierde doelstelling van het onderhavige onderzoek was het d.m.v. literatuuronderzoek vaststellen van de bovengrens van de stofdeeltjesgrootte welke bij inhalatie nog tot gezondheidseffecten kan leiden. Deze kennis is nodig om te bepalen of er redenen zijn om stofdeeltjes vanaf een bepaalde diameter buiten beschouwing te laten in het toetsingskader. Dit hoofdstuk beschrijft een literatuurstudie waarin onderzocht is in welke mate grotere stofdeeltjes in inhaleerbare stof de luchtwegen of alveolaire regio bereiken en wat bekend is over deeltjesgrootte in samenhang met de effecten van endotoxinen op de luchtwegen. Op basis hiervan is overwogen of een bovengrens moet worden gesteld aan de deeltjesgrootte die in de verspreidingsberekeningen moeten worden opgenomen.

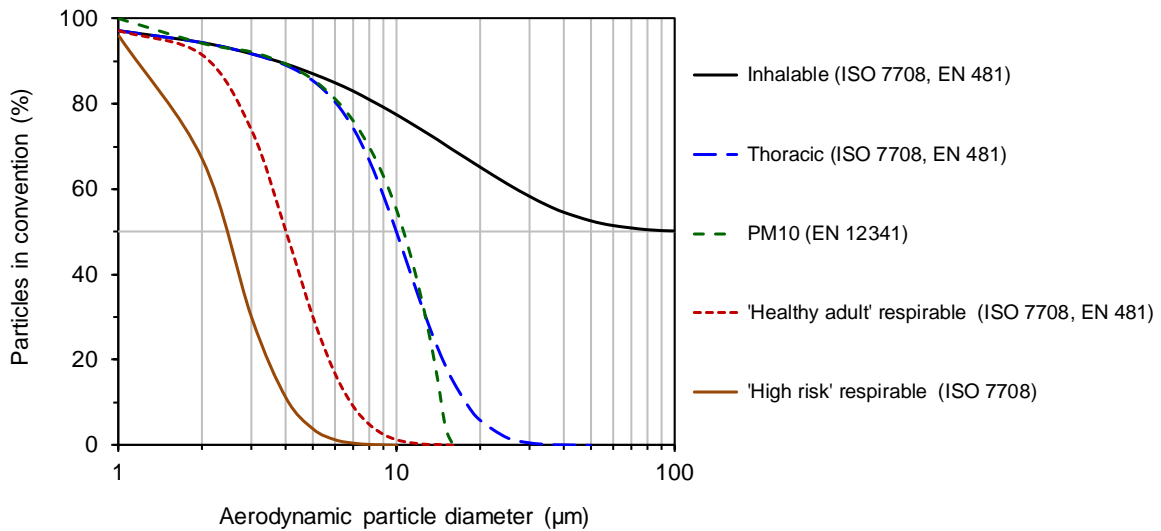
### 5.1 Definitie van stoffracties in monsternamen conventies

Voor metingen in de buitenlucht zijn de voornaamste stoffracties PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub>. De PM<sub>10</sub> fractie bestaat uit deeltjes met aerodynamische diameters kleiner dan 10 µm. Omdat het fysisch onmogelijk is om deeltjes te bemonsteren tot een zeer scherp afgesneden bovengrens wordt de bovengrens beschreven met een zogenaamde 'cut off curve' of 'afsnijcurve' welke het percentage bemonsterde deeltjes weergeeft als functie van de aerodynamische diameter (Figuur 7). Voor PM<sub>10</sub> geldt daarbij dat het 50% punt in de afsnijcurve correspondeert met een diameter van 10 µm. Voor PM<sub>2,5</sub> geldt dat het 50% punt in de afsnijcurve correspondeert met een diameter van 2,5 µm. De fracties PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub> die in de buitenlucht worden gehanteerd hebben een scherpe afsnijcurve.

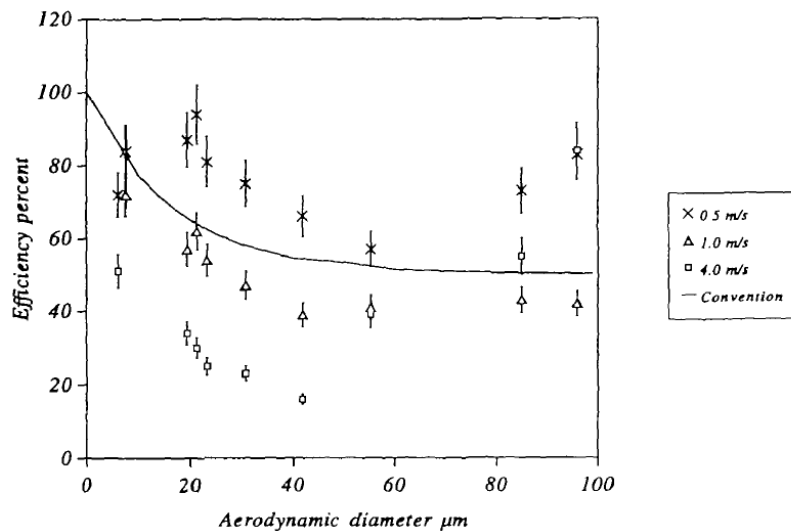
Stoffracties worden voor stofmetingen in de werkomgeving gedefinieerd op basis van het deel van het luchtwegorgaan waar voorbij het stof ingeademd kan worden. Inhaleerbaar stof is gedefinieerd als dat deel van het aanwezige stof dat kan worden ingeademd door neus en/of mond. In de werkomgeving zijn verder ook de thoracale fractie (~PM<sub>10</sub>), de 'Healthy adult' respirabele fractie (~PM<sub>4</sub>) en de 'High risk' respirabele fractie (~PM<sub>2,5</sub>) gedefinieerd. De thoracale fractie is dat deel van het aanwezige stof dat verder dan het strottenhoofd kan doordringen. De respirabele fractie is dat deel van het stof dat kan doordringen tot in de longblaasjes.

De verschillende stoffracties, hun benamingen en hun afsnijcurven worden zogenaamde bemonsteringsconventies genoemd welke zijn vastgelegd in diverse internationale standaarden. Deze conventies zijn grafisch weergegeven in Figuur 7. De bemonsteringsconventie van de PM<sub>10</sub> fractie wijkt af van die van de thoracale fractie, met name deeltjes met een aerodynamische diameter groter dan 10 µm worden bij thoracaal stof nog met grotere efficiëntie bemonsterd. Deze minder steile afsnijcurve voor thoracaal stof komt meer overeen met de afvangst van deeltjes zoals die in de luchtwegen optreedt terwijl de scherpe afsnijcurve voor PM<sub>10</sub> beter geschikt is om te gebruiken in verspreidingsmodellering. De monsternamenapparatuur die in dit onderzoek is gebruikt voor de PM<sub>10</sub> fractie (een cycloon voorafscheider met filter en luchtpomp) volgt de bemonsteringsconventie voor

PM<sub>10</sub>. De monsternamenameapparatuur die in dit onderzoek is gebruikt voor de inhaleerbaar stof fractie (de IOM-sampler met filter en luchtpomp) volgt redelijk goed de bemonsteringsconventie voor inhaleerbaar stof bij omgevingsluchtsnelheden tussen 0,5 en 4 m/s. De stroomsnelheid van de lucht waarin de sampler wordt geplaatst is van belang omdat deze niet teveel dient af te wijken van de luchtsnelheid in de aanzuigopening van de sampler (het zogenaamde isokinetisch bemonsteren). Bij lage omgevingsluchtsnelheden ( $\sim <0,5$  m/s) en in omgevingen met grote deeltjes ( $>100$   $\mu\text{m}$ ) neigt de IOM-sampler naar overbemonstering (Kenny et al., 1997; Sleeth & Vincent, 2012). Uit de monsternamename efficiëntie voor de IOM-sampler (Figuur 8) valt af te leiden dat deeltjes met een diameter tussen 20 en 100  $\mu\text{m}$  met een efficiëntie van circa 40 tot 70% ingevangen worden.



**Figuur 7**  
 Bemonsteringsconventies voor de fracties inhaleerbaar stof (Inhalable), thoracaal stof (Thoracic), PM10, 'Healthy adult' respirabel stof en 'High risk' respirabel stof. Achter de fractie is de internationale standaard weergegeven waarin de afsnijcurve is vastgelegd. Figuur afkomstig uit Winkel et al. (2014a).



**Figuur 8**  
 Experimenteel waargenomen monsternamename efficiëntie van de IOM-sampler in afhankelijkheid van deeltjesgrootte en omgevingsluchtsnelheid. Hoe dichterbij de lijn hoe meer de waargenomen monsternamename de conventie voor inhaleerbaar stof benadert. Figuur overgenomen (met toestemming) uit Kenny et al. (1997).

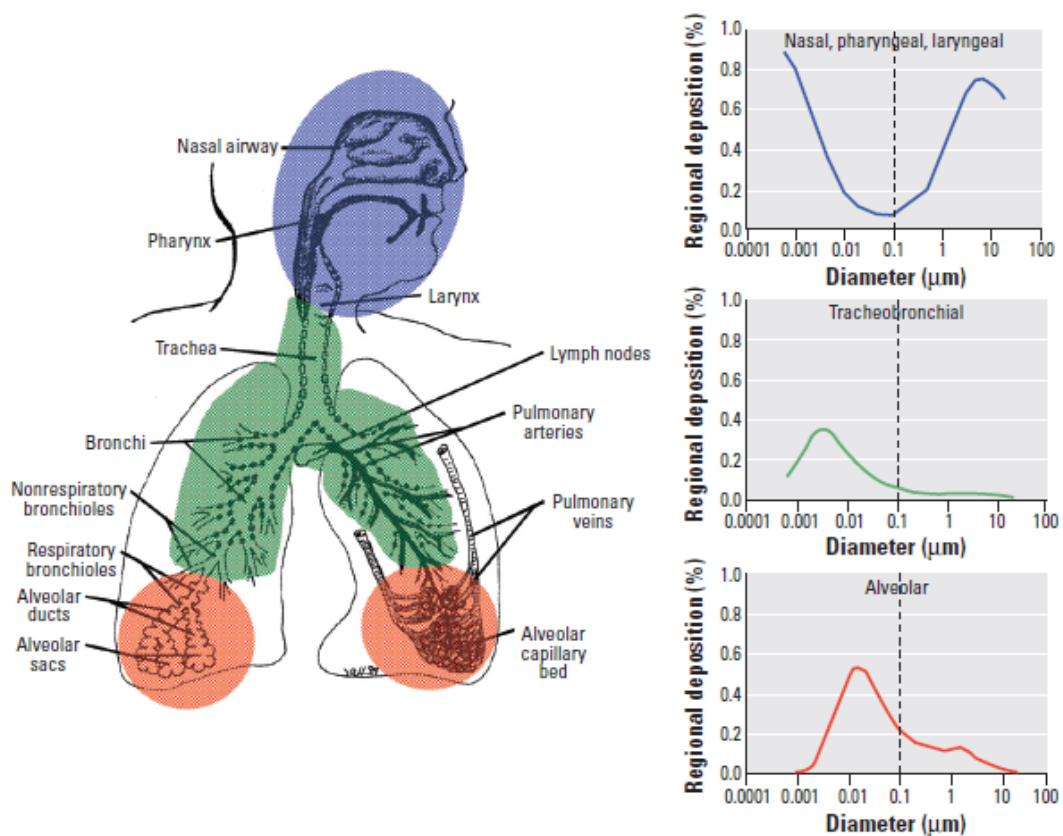


## 5.2 Deeltjesgrootte afhankelijke depositie in luchtwegen

In de loop der jaren zijn er verschillende modellen ontwikkeld die depositie van deeltjes in de luchtwegen voorspellen (Hofmann, 2009). De modellen verschillen in aanpak van semi-experimenteel tot diverse stochastische modellen en zijn gevalideerd tot deeltjes met een grootte van 10  $\mu\text{m}$ . Een onderscheid wordt gemaakt tussen modellen die totale longdepositie beschrijven en modellen die depositie in een specifiek gebied beschrijven (bronchiën of longblaasjes: regionale depositiemodellen). Alleen modellen voor totale depositie zijn gevalideerd, voor regionale modellen is dit maar ten dele mogelijk gebleken. De verschillen tussen totale longdepositiemodellen zijn niet groot en komen goed overeen met de experimentele gegevens.

Het veel gebruikte semi-experimentele regionaal longdepositie model dat door de Internationale Commissie voor Radiologische Protectie ontwikkeld is in 1966 en bijgesteld in 1994 (ICRP, 1994), is het enige model waarvoor informatie over depositie van deeltjes met diameters groter dan 10  $\mu\text{m}$  beschikbaar is. Figuur 9 is een voorbeeld van de voorspelde regionale depositie in de neus/mond/keel, tracheobronchiale delen en alveolaire delen van de luchtwegen voor stofdeeltjes tijdens neusademhaling en laat zien dat de deeltjes groter dan 10  $\mu\text{m}$  grotendeels terecht komen in de neusregio. Dit geldt ook voor de deeltjes tussen 1 en 10  $\mu\text{m}$  grootte, maar daarvan deponeren een relatief groter deel in de alveolaire longblaasjes.

Neusademhaling beschermt de tracheobronchiale regio van de luchtwegen tegen depositie van grote en zeer kleine deeltjes doordat deze in de neus regio deponeren. De tracheobronchiale depositie van grotere deeltjes (>10  $\mu\text{m}$ ) kan wel tot 25% of meer verhogen bij ademhaling door de mond (Stuart, 1984; Lipmann et al., 1984)



**Figuur 9**

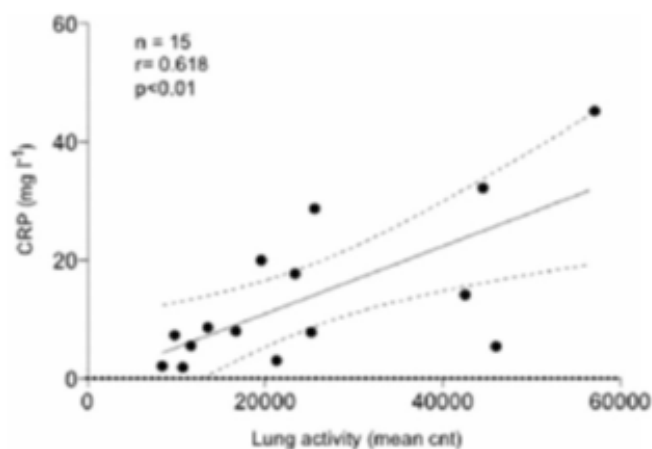
Voorspelde regionale depositie van geinhaleerde deeltjes in de neus/mond/keel, de tracheobronchiale en alveolaire delen van de luchtwegen bij neusademhaling. Figuur overgenomen (met toestemming) uit Oberdorster et al. (2005), gebaseerd op data van de ICRP (1994).

## 5.3 Deeltjesgroottes in endotoxine gerelateerd gezondheidseffecten onderzoek

Het meeste onderzoek naar de gezondheidseffecten van endotoxine blootstelling is verricht in de werkomgeving, waarbij de endotoxine blootstelling in de inhaleerbaar stoffractie is bepaald. Veel van deze studies zijn samengevat in de rapportages van de Gezondheidsraad (1998; 2010) waarin een grenswaarde voor endotoxine in de werkomgeving is afgeleid. De geadviseerde grenswaarde is grotendeels gebaseerd op een studie van Castellan et al. (1987) naar acute longfunctie verandering bij gezonde vrijwilligers na blootstelling aan endotoxine afkomstig van katoen. De blootstelling aan katoenstof vond hierbij plaats in een experimentele setting in een expositiekamer. De precieze deeltjesgrootteverdeling van het stof en de stoffractie waarvoor de endotoxineconcentratie bepaald is zijn niet beschreven. Naast deze experimentele studie werden ook de resultaten van studies uitgevoerd in de mengvoederindustrie meegewogen in de besluitvorming van de Gezondheidsraad (Smid et al., 1992; 1994), met name om bescherming ten aanzien van langdurige blootstelling mee te wegen. In deze studies werd de endotoxineconcentratie in de inhaleerbaar stoffractie bepaald. De geadviseerde grenswaarde voor de werkomgeving heeft dus betrekking op de inhaleerbaar stoffractie. De hiervan afgeleide grenswaarde voor endotoxine in de woonomgeving (Gezondheidsraad, 2012) heeft derhalve ook betrekking op de inhaleerbaar stoffractie.

De EMBASE literatuur database is structureel doorzocht op informatie over endotoxine en long depositie met behulp van de zoekwoorden "endotoxin" AND "lung deposition". Dit resulteerde in 108 referenties waarvan er 86 op basis van een beoordeling van de titel niet verder beschouwd zijn. Van de resterende 22 publicaties is de samenvatting beoordeeld op het voorkomen van informatie over depositie van endotoxine. Hieruit zijn 5 publicaties geselecteerd voor bestudering van de volledige publicatie. Hiervan bleven er twee over waarin verschillende deeltjesgroottes en/of verschillen in regionale depositie van endotoxine in relatie tot gezondheidseffecten bestudeerd werden.

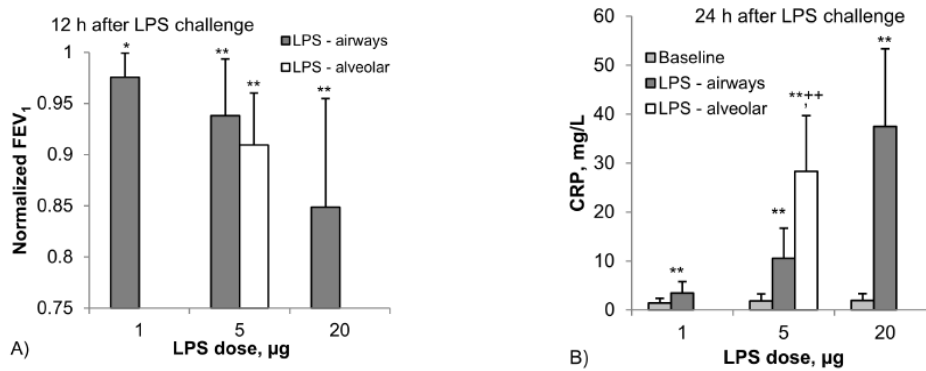
De eerste studie van Doyen et al. (2016) bestudeerde verschillen in totale longdepositie en gezondheidseffecten van endotoxine dat geïnhaled werd na verneveling. Er werden verschillende vernevelaars toegepast welke verschilden in de mediane diameter van de druppeltjes die ingeademd werden, te weten een mediane diameter van 2,0, 3,2 en 7,9  $\mu\text{m}$ . De totale longdepositie van endotoxine verneveld in grotere druppeltjes was groter dan voor endotoxine verneveld in kleinere druppeltjes (<2.5  $\mu\text{m}$ ) en resulteerde in sterkere ontstekingsreacties, zowel bronchiaal als systemisch. Dat kleinere druppeltjes resulteerden in minder sterke ontstekingsreacties had waarschijnlijk te maken met een verminderde inhalatiedosis, want van het endotoxine dat in kleinere druppels verneveld was, werd meer weer uitgeademd dan van het endotoxine dat in grotere druppels verneveld was. Inderdaad werd er een verband aangetoond tussen de totale hoeveelheid longdepositie van endotoxine en de systemische ontstekingsrespons: hoe hoger de longdepositie des te sterker de waargenomen ontstekingsreactie (Figuur 10).



**Figuur 10**

Relatie tussen de waargenomen longdepositie van endotoxine en het optreden van een systemische ontstekingsreactie, bepaald als CRP (C-reactief proteïne) concentratie in bloed, 24 uur na inhalatie van endotoxine. Figuur overgenomen (met toestemming) uit Doyen et al. (2016).

In de tweede studie (Möller et al., 2012) werd endotoxine middels twee verschillende technieken ingeademd. De lokale en systemische ontstekingsreactie als gevolg van de endotoxineblootstelling (Figuur 11 B; uitgedrukt als CRP concentratie in bloed) was minder sterk wanneer de inhalatie van endotoxine in de gehele luchtwegen plaatsvond ('LPS - airways') dan wanneer de inhalatie gericht was op depositie in de longblaasjes ('LPS - alveolar'). Voor verandering in longfunctie (Figuur 11A; uitgedrukt als FEV<sub>1</sub>) werd echter een vergelijkbare respons gevonden ongeacht of dezelfde dosis endotoxine in de luchtwegen of in de longblaasjes toegediend werd. De auteurs vermoeden dat de systemische ontstekingsreactie na depositie in de longblaasjes bijdraagt aan de waargenomen vergelijkbare verandering in longfunctie.



**Figuur 11**

Gezondheidsmaten na inhalatie van verschillende dosissen endotoxine ('LPS dose') in de luchtwegen of longblaasjes (alveolar). Figuur A geeft de genormaliseerde longfunctie (FEV<sub>1</sub>) 12 uur na inhalatie en Figuur B de systemische ontstekingsreacties (CRP) 24 uur na inhalatie. Figuren overgenomen (met toestemming) uit Möller et al. (2012).

Resultaten van beide studies suggereren dat er verschillende responsen kunnen optreden afhankelijk van waar in de luchtwegen depositie van endotoxinen plaatsvindt, maar de huidige stand van kennis is niet voldoende om de verspreidingsmodellering daarop aan te passen.

## 5.4 Praktische uitwerking t.b.v. dit onderzoek

Er is weinig informatie over depositie in de luchtwegen van deeltjes groter dan 10 µm. De gegevens die voorhanden zijn suggereren dat grotere deeltjes slechts in beperkte mate in de lagere luchtwegen zullen doordringen. Gezondheidseffectenstudies voor endotoxine zijn voornamelijk uitgevoerd met inhaleerbaar stof. Vooral nog is het daarom verstandig de verspreidingsmodellering ten behoeve van een toetsingskader of analyses gericht op het vaststellen van relaties tussen omgevingsblootstelling en gezondheidseffecten, zoals die beschikbaar zijn voor de VGO studie, uit te voeren voor endotoxine in PM<sub>10</sub> en inhaleerbaar stof zoals in dit onderzoek tot nog toe gedaan.

---

# 6 Deelstudie E: van gemeten naar verfijnde stof- en endotoxinecijfers

## 6.1 Achtergrond van de verfijning

Endotoxine wordt verondersteld via stof te emitteren, daarom wordt de verspreiding van endotoxinen gemodelleerd aan de hand van de verspreiding van stofdeeltjes in combinatie met het endotoxinegehalte van de stofdeeltjes. Het gaat dan niet alleen om  $PM_{2,5}$  en  $PM_{10}$  (fijn stof), maar ook om inhaleerbaar stof ( $PM_{100}$ ), dat voor een belangrijk deel uit deeltjes tussen  $10\ \mu m$  en  $100\ \mu m$  bestaat en dus ook meer massa heeft. Voor de werkwijze heeft dit drie belangrijke consequenties:

1. de verdeling van de stofmassa over deeltjesgrootteklassen inclusief de grotere deeltjesfracties moet bekend zijn en moet worden opgenomen in de modelberekeningen;
2. de verdeling van het endotoxinegehalte in de deeltjesgrootteklassen dient bekend te zijn;
3. de depositie van de (met name grotere) deeltjes moet in de berekeningen worden meegenomen.

De metingen uit hoofdstuk 3 betroffen vier stoffracties:  $PM_{100}$ ,  $PM_{30}$ ,  $PM_{10}$  en  $PM_{2,5}$ . Om de verspreiding en depositie van de deeltjes nauwkeuriger te kunnen modelleren zijn in het voorgaande deel van dit onderzoek (Ogink et al., 2016) de stoffracties verfijnd naar 10 deeltjesgrootteklassen met voor elke klasse een relatieve bijdrage aan de totale stofconcentratie in de ventilatielucht ( $PM_{100}$ ) en een klasse-specifiek endotoxinegehalte (EU/mg stof). Deze verfijning is nodig, omdat deeltjes groter dan  $10\ \mu m$  een depositiesnelheid hebben die maakt dat de concentraties in de lucht afnemen met toenemende afstand van de bron. De depositiesnelheid neemt snel toe met de deeltjesgrootte: met 4 klassen wordt deze toename onvoldoende fijnmazig beschreven; 10 klassen zijn wel voldoende om dit verloop te volgen. Op basis van de totale dataset (60 metingen bij 18 stallen; hoofdstuk 3) is deze verfijning in dit rapport opnieuw uitgevoerd.

## 6.2 Verfijning verdeling stofmassa

### *Werkwijze*

Zowel in het onderzoek van Lai et al. (2014) als in dit onderzoek is de deeltjesgrootteverdeling bepaald voor de zes diercategorieën middels een lichtverstrooiingsmeetmethode (Bijlage B3; resultaten in hoofdstuk 3). Deze metingen omvatten de deeltjes in 30 grootteklassen van  $0,25$  tot  $32\ \mu m$ . De gemeten deeltjesconcentraties in deze grootteklassen (aantal per liter) zijn omgerekend naar massaconcentraties aan de hand van de gemiddelde diameter in de grootteklasse en door te veronderstellen dat deeltjes bolvormig zijn met een soortelijke massa van  $1,5\ g/cm^3$  (voor alle grootteklassen). Hiermee is een verdeling van de stofmassa verkregen voor 30 deeltjesklassen van  $0,25$  tot  $32\ \mu m$ . Daarnaast bevat hoofdstuk 3 stofconcentraties in de vier stoffracties:  $PM_{100}$ ,  $PM_{30}$ ,  $PM_{10}$  en  $PM_{2,5}$  waarbij de meetcijfers t.a.v.  $PM_{100}$  en  $PM_{30}$  informatie geven over de massaverdeling boven  $30\ \mu m$ . De verfijning is uitgevoerd door de meetcijfers van de lichtverstrooiingsmeetmethode ( $0,25$  tot  $30\ \mu m$ ) en de gravimetrische meetmethode ( $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $PM_{30}$  en  $PM_{100}$ ) te combineren in een modelmatige aanpak.

In deze aanpak is de verdeling van de stofmassa van deeltjes tot  $100\ \mu m$  opgebouwd door uit te gaan van de verhouding tussen  $PM_{100}$  en  $PM_{10}$  zoals gepubliceerd voor Nederlandse stallen door Winkel et al. (2015). De 'ophoogfactor'  $PM_{100}/PM_{10}$  in deze data bedroeg  $2,50$  voor leghennen,  $2,27$  voor vleeskuikens,  $3,13$  voor vleesvarkens,  $3,13$  voor zeugen,  $3,23$  voor biggen en  $16,7$  voor melkkoeien. Het bepalen van de  $PM_{30}$  fractie kan nu op twee manieren gebeuren; namelijk door uit te gaan van de gemeten  $PM_{10}$  concentratie of uit te gaan van de gemeten  $PM_{100}$  concentratie. Door de gemeten  $PM_{10}$  concentratie ( $PM_{10m}$ ) te verhogen met deze factor wordt een virtuele  $PM_{100}$  concentratie verkregen ( $PM_{100v}$ ). De virtuele  $PM_{30}$  concentratie ( $PM_{30v}$ ) moet hiertussen worden gelokaliseerd.

Deze is bepaald als:

$$PM_{30v} = PM_{10m} + (PM_{30m} - PM_{10m}) * \frac{(PM_{100m} - PM_{10m})}{(PM_{100v} - PM_{10m})}$$

Met andere woorden: bij de gemeten  $PM_{10}$  concentratie is het gecorrigeerde verschil tussen het gemeten  $PM_{30}$  ( $PM_{30m}$ ) en het gemeten  $PM_{10}$  ( $PM_{10m}$ ) opgeteld. De correctie is dan evenredig met de verhouding tussen gemeten verschil  $PM_{100}-PM_{10}$  en het verschil tussen de virtuele  $PM_{100}$  en  $PM_{10}$ . Op dezelfde manier is de waarde van  $PM_{30}$  bepaald door uit te gaan van de gemeten  $PM_{100}$  concentratie en daaruit die van  $PM_{30}$  af te leiden. De twee schattingen zijn gemiddeld en deze gemiddelde waarden zijn in het vervolg gebruikt voor  $PM_{30}$ .

De massaverdeling van de lichtverstrooiingsmeetmethode is gecorrigeerd in twee stappen. Ten eerste is de verdeling van de lichtverstrooiingsmeetmethode van 0 tot 10  $\mu m$  gecorrigeerd met de verhouding tussen de  $PM_{10}$  fracties van gravimetrische en lichtverstrooiingsmeetmethode. Daarna is de uit de gravimetrische metingen bekende  $PM_{30}/PM_{100}$  verhouding (hoofdstuk 3) gebruikt om de grootste deeltjesfractie (tot 30  $\mu m$ ) van de lichtverstrooiingsmeetmethode aan gelijk te stellen. Het traject van 10 tot 30  $\mu m$  moet dan gecorrigeerd worden. Dit is gedaan analoog aan de bovenstaande formule:

$$PM_{xv} = PM_{10m} + (PM_{30m} - PM_{10m}) * \frac{(PM_{xg} - PM_{10m})}{(PM_{30v} - PM_{10m})}$$

waarbij  $PM_x$  staat voor een fractie tussen 10 en 30  $\mu m$ ;  $PM_{10m}$  voor de gemeten  $PM_{10}$  fractie,  $PM_{30v}$  voor de gecorrigeerde  $PM_{30}$  fractie (gecorrigeerd: v) en g staat voor de oorspronkelijke waarde volgens de lichtverstrooiingsmeetmethode.  $PM_{10g}$  is door de eerdere correctie gelijk aan  $PM_{10m}$  geworden.

Voor elk van de zes diercategorieën is een bimodale verdeling (bestaande uit twee lognormale functies) van de stofmassa gemodelleerd. Dit is gebeurd door de natuurlijke logaritme van de deeltjesdiameter te fitten aan twee normaalverdelingen met als parameters: het gemiddelde ( $\mu$ ), de standaardafwijking ( $\sigma$ ) en een constante. In MS Excel is via de Goal Seek functionaliteit bepaald welke parameterwaarden het beste passen bij de gemeten waarden. De twee fits zijn uitgevoerd op 37 deeltjesdiameters, namelijk: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90; 95 en 100  $\mu m$ . De uit de twee fits verkregen waarden zijn vervolgens bij elkaar opgeteld tot één cumulatieve verdeling van de stofmassa (lopend van 0 tot 1 voor deeltjes van 0 tot 100  $\mu m$ ). Deze tussenverdeling met 37 deeltjesdiameters is weer teruggebracht tot 10 deeltjesgrootteklassen door te middelen over de 37 deeltjestrajecten, gewogen naar de breedte van die trajecten. Alleen voor melkkoeien is voor de tweede verdeling afgeweken van de lognormale verdeling: deze zou een te groot aandeel grovere deeltjes opleveren. Dit lijkt niet erg realistisch, daarom is voor deze diersoorten een uniforme verdeling genomen voor het traject van 30 – 100  $\mu m$ .

### *Resultaten*

De resultaten van de tussenverdelingen van de stofmassa én de gemeten verdelingen van de stofmassa worden weergegeven in Figuur 12. Uit deze figuur blijkt dat met de hiervoor beschreven werkwijze de verkregen verdelingen goed 'passen' op de gemeten verdelingen. De verkregen verdeling van de stofmassa over de 10 deeltjesgrootteklassen is weergegeven in Tabel 13. De gegevens in Tabel 13 vormen de directe input voor het verspreidingsmodel.

## 6.3 Verfyning endotoxinegehalten

### *Werkwijze*

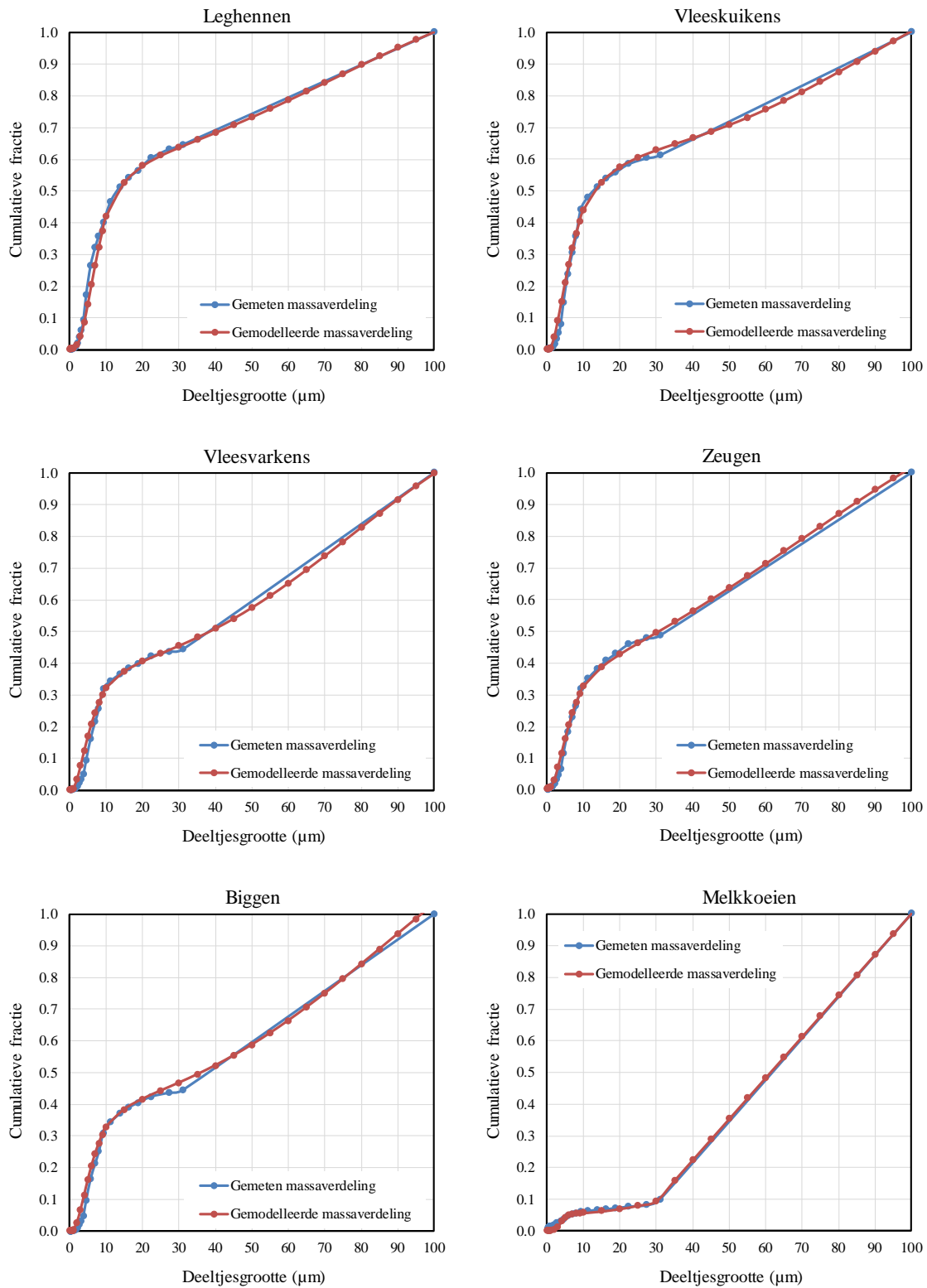
De verfyning van de gemeten endotoxinegehalten (EU/mg; in  $PM_{100}$ ,  $PM_{30}$ ,  $PM_{10}$  en  $PM_{2,5}$ ) naar endotoxinegehalten in de 10 deeltjesgrootteklassen voor de verspreidingsmodellering is gedaan door opnieuw gebruik te maken van de tussenverdeling met de hiervoor genoemde 37 deeltjesdiameters.

---

Over de 37 deeltjesdiameters, mét de verkregen verdeling van de stofmassa (zoals in par. 6.2 beschreven), is een endotoxinegehalte zodanig verdeeld dat de uit deze tussenverdeling verkregen endotoxinegehalten voor  $PM_{100}$ ,  $PM_{30}$ ,  $PM_{10}$  en  $PM_{2,5}$  zo goed mogelijk passen bij de gemeten endotoxinegehalten voor deze fracties. Voor alle diersoorten zijn de endotoxinegehalten voor de 37 deeltjesdiameters met de hand opgesteld.

#### *Resultaten*

De resultaten van de endotoxinegehalten in de tussenverdelingen worden weergegeven in Figuur 13. In Figuur 14 worden de uit de tussenverdeling verkregen endotoxinegehalten voor  $PM_{100}$ ,  $PM_{30}$ ,  $PM_{10}$  en  $PM_{2,5}$  vergeleken met de gemeten endotoxinegehalten. Hieruit blijkt dat met de hiervoor beschreven werkwijze de verkregen endotoxinegehalten goed 'passen' op de gemeten endotoxinegehalten. Tabel 14 ten slotte toont de verkregen endotoxinegehalten in de 10 deeltjesgrootteklassen. De gegevens in Tabel 14 vormen de directe input voor het verspreidingsmodel.



**Figuur 12**

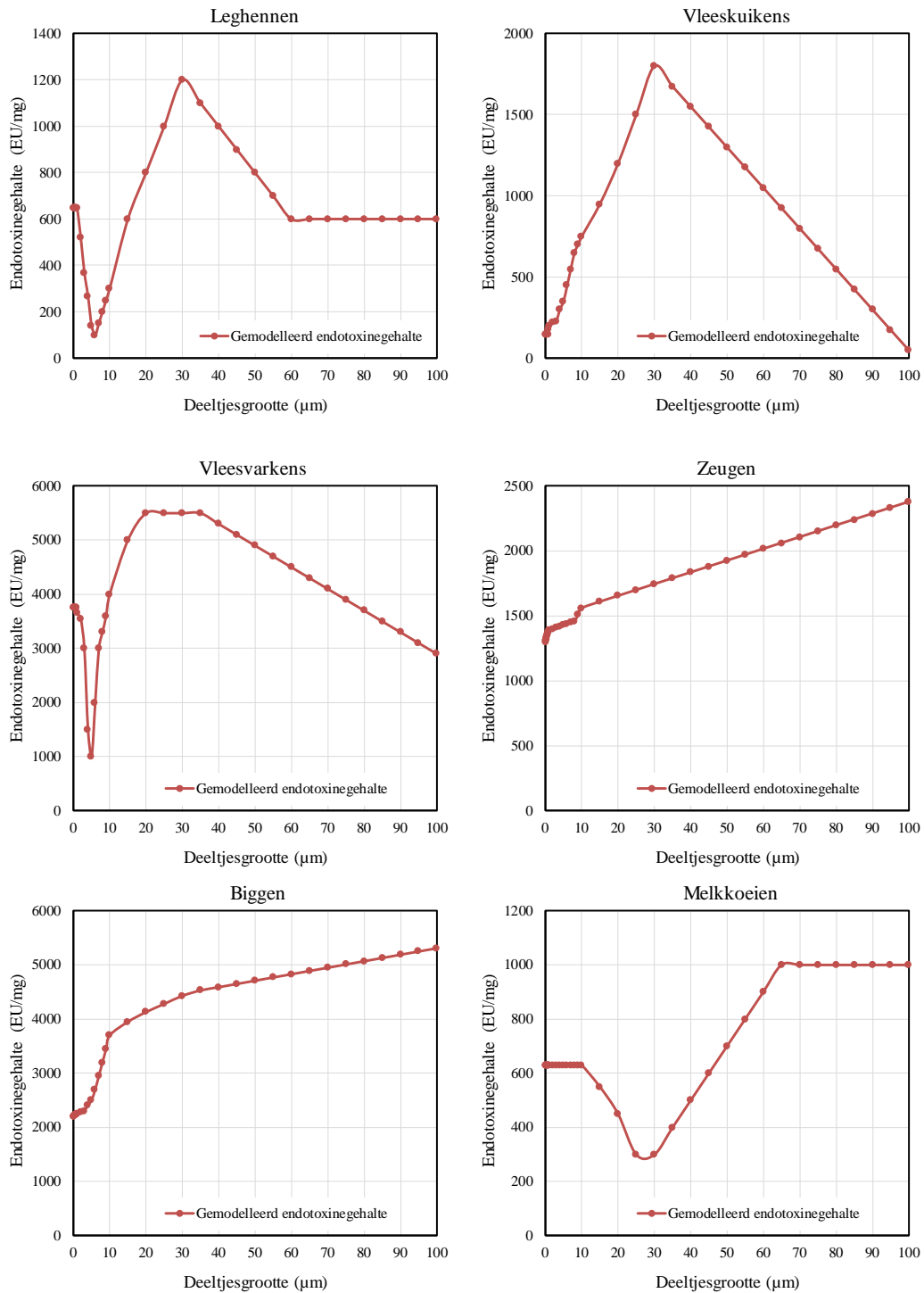
*Cumulative massafractie als functie van de deeltjesdiameter zoals gemeten met de lichtverstrooiingsmeetmethode (GRIMM PAS model 1.109) en de gravimetrische meetmethoden (hoofdstuk 3) en zoals gemodelleerd voor 37 deeltjesdiameters in de tussenverdeling.*

**Tabel 13**

De 10 deeltjesgrootteklassen voor gebruik in de verspreidingsmodellering en de gemodelleerde relatieve massaverdeling over deze klassen voor elk van de diercategorieën.

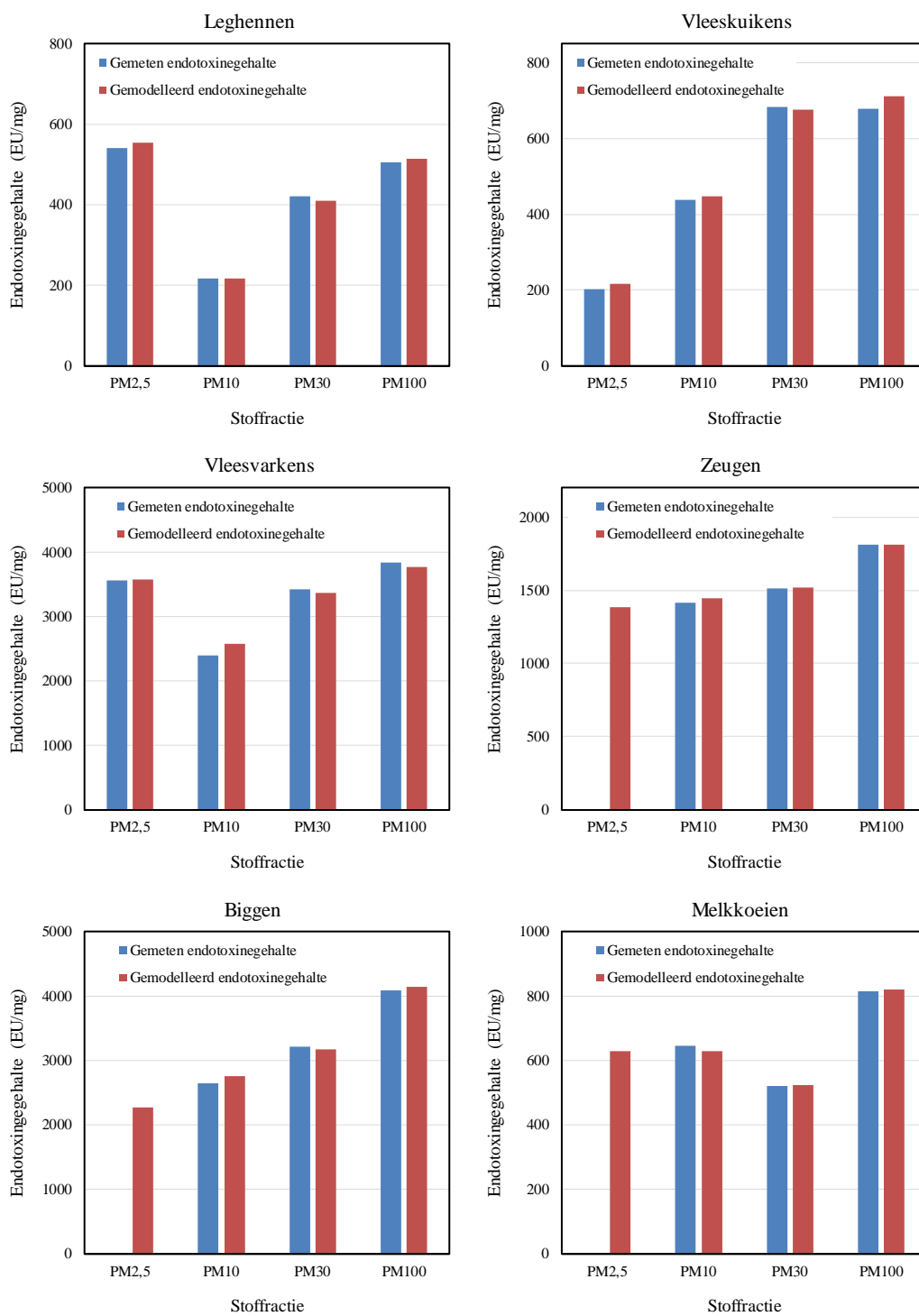
Deeltjes- klasse	Aerodynamische diameter ( $\mu\text{m}$ )			Diercategorie					
	Van	Tot	Gem.	Leghennen	Vleeskuikens	Vleesvarkens	Zeugen	Biggen	Melkkoeien
1	1	6	2	0.205	0.267	0.209	0.204	0.205	0.049
2	6	10	8	0.214	0.171	0.113	0.122	0.124	0.008
3	10	16	13	0.118	0.097	0.058	0.069	0.062	0.007
4	16	22	19	0.056	0.051	0.035	0.047	0.037	0.010
5	22	28	25	0.035	0.032	0.030	0.041	0.031	0.015
6	28	35	31	0.034	0.029	0.036	0.047	0.036	0.070
7	35	45	40	0.048	0.039	0.060	0.070	0.060	0.129
8	45	58	51	0.067	0.060	0.095	0.098	0.094	0.168
9	58	75	66	0.094	0.097	0.146	0.133	0.147	0.220
10	75	100	87	0.132	0.160	0.215	0.186	0.236	0.324
Totaal	1	100		1	1	1	1	1	1





**Figuur 13**

Gemodelleerd endotoxinegehalte in het stof als functie van de deeltjesdiameter zoals gemodelleerd voor 37 deeltjesdiameters in de tussenverdeling.



**Figuur 14**

Endotoxinegehalten in de stoffracties zoals bepaald in het stof bemonsterd met de gravimetrische meetmethoden (hoofdstuk 3) en in de stoffracties vanuit het modelleren van 37 deeltjesdiameters in de tussenverdeling.

**Tabel 14**

De 10 deeltjesgrootteklassen voor gebruik in de verspreidingsmodellering en het gemodelleerde endotoxinegehalte in deze klassen voor elk van de diercategorieën.

Deeltjes- klasse	Aerodynamische diameter ( $\mu\text{m}$ )			Diercategorie					
	Van	Tot	Gem.	Leghennen	Vleeskuikens	Vleesvarkens	Zeugen	Biggen	Melkkoeien
1	1	6	2	382	274	2620	1405	2383	630
2	6	10	8	244	678	3544	1518	3422	630
3	10	16	13	466	1165	4540	1589	3839	582
4	16	22	19	756	1161	5322	1645	4086	466
5	22	28	25	985	1969	5500	1697	4269	334
6	28	35	31	1145	2048	5500	1761	4462	342
7	35	45	40	1000	1550	5300	1835	4590	500
8	45	58	51	787	1290	4884	1929	4715	708
9	58	75	66	600	884	4235	2075	4910	965
10	75	100	87	600	363	3400	2263	5160	1000

---

## 7 Lijst van geciteerde bronnen

- Aarnink, A. J. A., M. Cambra-López, T. L. H. Lai, and N. W. M. Ogink. 2011. Deeltjesgrootteverdeling en bronnen van stof in stallen [Size distribution and sources of particulate matter in animal houses]. Report 452. Lelystad, the Netherlands: Wageningen University and Research Centre, Livestock Research.
- Adell, E., S. Calvet, A. G. Torres, and M. M. Cambra-López. 2012. Particulate matter concentrations and emissions in rabbit farms. *World Rabbit Science* 20(1): 1-11.
- Almuhanna, E. A. 2013. Concentration, size distribution and electrostatic charge of laying hen house particulate matter. *Environment and Pollution* 2(3): 67-80.
- Borlee, F., C. Joris Yzermans, B. Aalders, J. Rooijackers, E. Krop, C. B. M. Maassen, F. Schellevis, B. Brunekreef, D. Heederik, and L. A. M. Smit. 2017. Air pollution from livestock farms is associated with airway obstruction in neighboring residents. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 196(9): 1152-1161
- Cambra-López, M., T. Hermosilla, H. T. L. Lai, A. J. A. Aarnink, and N. W. M. Ogink. 2011. Particulate matter emitted from poultry and pig houses: Source identification and quantification. *Trans. ASABE* 54(2): 629-642.
- Castellan, R. M., S. A. Olenchok, K. B. Kinsley, and J. L. Hankinson. 1987. Inhaled endotoxin and decreased spirometric values. *New Engl. J. Med.* 317(10): 605-610.
- Doyen, V., G. Pilcer, P. H. D. Dinh, F. Corazza, A. Bernard, P. Bergmann, N. Lefevre, K. Amighi, and O. Michel. 2016. Inflammation induced by inhaled lipopolysaccharide depends on particle size in healthy volunteers. *British Journal of Clinical Pharmacology*: 1371-1381.
- Dusseldorp, A., C. B. M. Maassen, D. J. J. Heederik, and P. H. Fischer. 2015. Veehouderij en gezondheid. Update van kennis over werknemers en omwonenden [Livestock farming and health. Update on knowledge about health of workers and local residents]. RIVM Report 2015-0135. Bilthoven, the Netherlands: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (National Institute for Public Health and the Environment).
- Feddes, J. J. R., H. Cook, and Z. M. J. 1992. Characterization of airborne dust particles in turkey housing. *Canadian Agricultural Engineering* 34(3): 273-280.
- Gezondheidsraad. 1998. Endotoxins. Health-based recommended occupational exposure limit. The Hague, the Netherlands: Gezondheidsraad (Health Council of the Netherlands).
- Gezondheidsraad. 2010. Endotoxins. Health-based recommended occupational exposure limit. Publication number 2010/04OSH. The Hague, the Netherlands: Gezondheidsraad (Health Council of the Netherlands).
- Gezondheidsraad. 2012. Gezondheidsrisico's rond veehouderijen [Health risks around livestock farms]. Publication 2012/27. The Hague, the Netherlands: Gezondheidsraad (Health Council).
- Hagenaars, T. J., P. Hoeksma, A. M. de Roda Husman, A. Swart, and I. M. Wouters. 2017. Veehouderij en gezondheid omwonenden (aanvullende studies) [Livestock farming and the health of local residents (additional studies)]. RIVM Report 2017-0062. Bilthoven, the Netherlands: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (National Institute for Public Health and the Environment).
- Heber, A. J., M. Stroik, J. M. Faubion, and L. H. Willard. 1988. Size distribution and identification of aerial dust particles in swine finishing buildings. *Trans ASAE* 31(3): 882-887.
- Heederik, D. J. J., A. J. W. Opstal-van Winden, L. A. M. Smit, I. M. Wouters, M. Hooiveld, C. J. IJzermans, F. van der Sman-de Beer, P. P. M. Spreeuwenberg, A. de Bruin, and B. van Rotterdam. 2011. Mogelijke effecten van intensieve-veehouderij op de gezondheid van omwonenden: onderzoek naar potentiële blootstelling en gezondheidsproblemen [Potential effects of intensive livestock farming on health of local residents: research into potential exposures and health problems]. Utrecht, the Netherlands: Institute for Risk Assessment Sciences (IRAS), Universiteit Utrecht; Nederlands instituut voor onderzoek van de gezondheidszorg (NIVEL); Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM).
- Hinds, W. C. 1999. *Aerosol Technology. Properties, behavior, and measurement of airborne particles.* 2nd ed. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Hinz, T., and S. Linke. 2006. Air quality and emission factors in turkey production.
- Honey, L. F., and J. B. McQuitty. 1979. Some physical factors affecting dust concentrations in a pig facility. *Canadian Agricultural Engineering* 21(1): 9-14.
- ICRP. 1994. Human respiratory tract model for radiological protection. A report of a Task Group of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 66. *Annals of the ICRP* 24(1-3): 1-482.
- Jerez, S. B., Y. Zhang, and X. Wang. 2011. Measurement of particle size distribution in a swine building. *Trans. ASABE* 54(3): 1103-1117.
- Kenny, L. C., R. Aitken, C. Chalmers, J. F. Fabriès, E. Gonzalez-Fernandez, H. Kromhout, G. Lidén, D. Mark, G. Riediger, and V. Prodi. 1997. A collaborative european study of personal inhalable aerosol sampler performance. *Ann. Occup. Hyg.* 41(2): 135-153.
- Koon, J., J. R. Howes, W. Grub, and C. A. Rollo. 1963. Poultry dust: origin and composition. *Agricultural Engineering* 44: 608-609.

- Kornalijnslijper, J. E., J. C. Rahamat-Langendoen, and Y. T. H. P. Van Duynhoven. 2008. Volksgezondheidsaspecten van veehouderij-megabedrijven in Nederland - Zoönosen en antibioticumresistentie [Public health aspects of large-scale livestock farms in the Netherlands - Zoonoses and antibiotic resistance]. RIVM Briefrapport 215011002. Bilthoven, the Netherlands: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (National Institute for Public Health and the Environment).
- Lai, H. T. L., A. J. A. Aarnink, M. Cambra-López, T. T. T. Huynh, H. K. Parmentier, and P. W. G. Groot Koerkamp. 2014. Size distribution of airborne particles in animal houses. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 16(3):28-42.
- Lee, J., and Y. Zhang. 2008. Evaluation of gas emissions from animal building dusts using a cylindrical convective chamber. *Biosyst. Eng.* 99(3):403-411.
- Lippmann, M., D. B. Yeates, and R. E. Albert. 1980. Deposition, retention, and clearance of inhaled particles. *British Journal of Industrial Medicine* 37(4):337-362.
- Maassen, C. B. M., E. Van Duijkeren, Y. T. H. P. Van Duynhoven, A. Dusseldorp, P. Geenen, A. A. De Koeijer, M. P. G. Koopmans, F. Loos, W. F. Jacobs-Reitsma, R. De Jonge, and A. W. Van de Giessen. 2012. Infectierisico's van de veehouderij voor omwonenden [Risk of infections from livestock farming for people living nearby]. RIVM Report 609400004. Bilthoven, the Netherlands: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (National Institute for Public Health and the Environment).
- Maassen, C. B. M., L. A. M. Smit, I. M. Wouters, E. Van Duijkeren, I. Janse, T. J. Hagenaars, J. IJzermans, W. Van der Hoek, and D. J. J. Heederik. 2016. Veehouderij en gezondheid omwonenden [Livestock farming and the health of local residents]. RIVM Report 2016-0058 Bilthoven, the Netherlands: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (National Institute for Public Health and the Environment).
- Maghirang, R. G., M. C. Puma, Y. Liu, and P. Clark. 1997. Dust concentrations and particle size distribution in an enclosed swine nursery. *Trans ASAE* 40(3):749-754.
- Möller, W., I. Heimbeck, T. P. J. Hofer, G. Khadem Saba, M. Neiswirth, M. Frankenberger, and L. Ziegler-Heitbrock. 2012. Differential inflammatory response to inhaled lipopolysaccharide targeted either to the airways or the alveoli in man. *PLoS ONE* 7(4).
- Mostafa, E., C. Nannen, J. Henseler, B. Diekmann, R. Gates, and W. Buescher. 2016. Physical properties of particulate matter from animal houses—empirical studies to improve emission modelling. *Environmental Science and Pollution Research* 23(12):12253-12263.
- Nannen, C., G. Schmitt-Pauksztat, and W. Büscher. 2005. Mikroskopische Untersuchung von Staubpartikeln in Mastschweinställen: Unterschiede zwischen Flüssig- und Trockenfütterung. *Landtechnik* 60(4/2005):218-219.
- Oberdörster, G., E. Oberdörster, and J. Oberdörster. 2005. Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ. Health Perspect.* 113(7):823-839.
- Ogink, N., J. J. Erbrink, D. J. J. Heederik, A. Winkel, and I. M. Wouters. 2016. Emissies van endotoxinen uit de veehouderij: emissiemetingen en verspreidingsmodellering [Emissions of endotoxins from animal production: emission measurements and dispersion modelling]. Wageningen University and Research, Livestock Research. Wageningen, the Netherlands.
- Pedersen, S., M. Nonnenmann, R. Rautiainen, T. G. M. Demmers, T. Banhazi, and M. Lyngbye. 2000. Dust in pig buildings. *J Agric Saf Health* 6(4):261-274.
- Schaeffer, J. W., M. E. Davidson, A. Van Dyke, L. Krause, J. Tryon, M. Bradford, J. Volckens, and S. J. Reynolds. 2014. Size characterization and composition of inhalable bioaerosols at Colorado dairies (Handout of presentation). Fort Collins, CO, USA: Colorado State University.
- Schaeffer, J. W., S. Reynolds, S. Magzamen, A. Vandyke, N. R. Gottel, J. A. Gilbert, S. M. Owens, J. T. Hampton-Marcell, and J. Volckens. 2017. Size, Composition, and Source Profiles of Inhalable Bioaerosols from Colorado Dairies. *Environ. Sci. Technol.* 51(11):6430-6440.
- Schütz, A., J. Seedorf, E. Klasmeyer, and J. Hartung. 2005. Orientated PM10 measurements with a high volume sampler in a turkey barn. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. Southampton, Boston, USA: WITpress.
- Sleeth, D. K., and J. H. Vincent. 2012. Performance study of personal inhalable aerosol samplers at ultra-low wind speeds. *Ann. Occup. Hyg.* 56(2):207-220.
- Spaan, S., J. Schinkel, I. M. Wouters, L. Preller, E. Tielemans, E. T. Nij, and D. Heederik. 2008. Variability in endotoxin exposure levels and consequences for exposure assessment. *Ann. Occup. Hyg.* 52(5):303-316.
- Smid, T., D. Heederik, R. Houba, and P. H. Quanjer. 1992. Dust- and endotoxin-related respiratory effects in the animal feed industry. *American Review of Respiratory Disease* 146(6):1474-1479.
- Smid, T., D. Heederik, R. Houba, and P. H. Quanjer. 1994. Dust- and endotoxin-related acute lung function changes and work-related symptoms in workers in the animal feed industry. *Am. J. Ind. Med.* 25(6):877-888.
- Smit, L. A. M., G. J. Boender, W. D. Piters, W. A. A. De Steenhuijsen Piters, T. J. Hagenaars, E. G. W. Huijskens, J. W. A. Rossen, M. Koopmans, G. Nodelijk, E. A. M. Sanders, J. Yzermans, D. Bogaert, and D. J. J. Heederik. 2017. Increased risk of pneumonia in residents living near poultry farms: does the upper respiratory tract microbiota play a role? *Pneumonia* 9(3).
- Stuart, B. O. 1984. Deposition and clearance of inhaled particles. *Environ. Health Perspect.* VOL. 55:369-390.
- Takai, H., S. Pedersen, J. O. Johnsen, J. H. M. Metz, P. W. G. Groot Koerkamp, G. H. Uenk, V. R. Phillips, M. R. Holden, R. W. Sneath, J. L. Short, R. P. White, J. Hartung, J. Seedorf, M. Schröder, K. H. Linkert, and C. M. Wathes. 1998. Concentrations and emissions of airborne dust in livestock buildings in Northern Europe. *J. Agric. Eng. Res.* 70(1):59-77.

- 
- Wang-Li, L., Z. Cao, Q. Li, Z. Liu, and D. B. Beasley. 2013. Concentration and particle size distribution of particulate matter inside tunnel-ventilated high-rise layer operation houses. *Atmos. Environ.* 66:8-16.
- Winkel, A., P. Demeyer, A. Feilberg, M. Jørgensen, J. Puterflam, and P. Engel. 2014a. Measurement of particulate matter: recommendations for the VERA test protocol on air cleaning technologies. Report 797. Report produced under an ICT-AGRI project by: Wageningen University and Research Centre, Aarhus University, Danish Pig Research Centre, Institute for Agricultural and Fisheries Research (ILVO), the Technical Institute for Poultry Research (ITAVI), and the VERA Secretariat. Wageningen, the Netherlands: Wageningen UR Livestock Research.
- Winkel, A., I. M. Wouters, A. J. A. Aarnink, D. J. J. Heederik, and N. W. M. Ogink. 2014b. Emissies van endotoxinen uit de veehouderij: een literatuurstudie voor ontwikkeling van een toetsingskader [Emissions of endotoxins from animal production: a literature survey for development of an assessment framework]. Report 773. Wageningen, the Netherlands: Wageningen University and Research Centre, Livestock Research.
- Winkel, A., J. Mosquera, P. W. G. Groot Koerkamp, N. W. M. Ogink, and A. J. A. Aarnink. 2015. Emissions of particulate matter from animal houses in the Netherlands. *Atmos. Environ.* 111:202-212.
- Winkel, A. 2016. Particulate matter emission from livestock houses: measurement methods, emission levels and abatement systems. PhD thesis. Wageningen, the Netherlands. <http://dx.doi.org/10.18174/390454>: Wageningen University and Research.
- Yang, X., J. Lee, D. E. Barker, X. Wang, and Y. Zhang. 2012. Lognormal fitting of particle size distribution data monitored in animal buildings: Linear versus nonlinear regression approach. *Trans. ASABE* 55(2):699-707.
- Yang, X., J. Lee, Y. Zhang, X. Wang, and L. Yang. 2015. Concentration, size, and density of total suspended particulates at the air exhaust of concentrated animal feeding operations. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 65(8):903-911.

## Bijlage A: beschrijving stallen

Stallocatie	Rav-code	Beschrijving stalsysteem	Dierplaatsen	Luchtinlaat	Luchttuitlaat (capaciteit)	Productiecyclus
Leghennen 1	E 2.11.3	Voliërestal, 30-35% van de leefruimte roosters	17460	Mestbandbeluchting (0,7 m <sup>3</sup> /h per dier) + inlaatventielen zijgevels	Ventilatoren in eindgevel (9,0 m <sup>3</sup> /h per dier)	63 wk leggen, 3 wk leegstand
Leghennen 2	E 2.11.4	Voliërestal, 55-60% van de leefruimte roosters	12125	Mestbandbeluchting (0,7 m <sup>3</sup> /h per dier) + inlaatventielen zijgevels	Ventilatoren in eindgevel (10,4 m <sup>3</sup> /h per dier)	62 wk leggen, 2 wk leegstand
Leghennen 3	E 2.11.4	Voliërestal, 55-60% van de leefruimte roosters	47380	Mestbandbeluchting (0,7 m <sup>3</sup> /h per dier) + inlaatventielen zijgevels	Ventilatoren in eindgevel (9,4 m <sup>3</sup> /h per dier)	60 wk leggen, 1 wk leegstand
Leghennen 4	E 2.11.4	Voliërestal, 55-60% van de leefruimte roosters	29500	Mestbandbeluchting (0,7 m <sup>3</sup> /h per dier) + inlaatventielen zijgevels	Ventilatoren in eindgevel (11,9 m <sup>3</sup> /h per dier)	60 wk leggen, 2 wk leegstand
Vleeskuikens 1	E 5.10	Grondstal met warmteheaters	44500	Inlaat ventielen in zij- en voorgevels	Ventilatoren in eindgevel (10,6 m <sup>3</sup> /h per dier)	34-42 d groei (2,2 kg), 1 wk leegstand
Vleeskuikens 2	E 5.10	Grondstal met warmteheaters	13500	Inlaat ventielen in zijgevels	Ventilatoren in eindgevel (7,6 m <sup>3</sup> /h per dier)	34-38 d groei (2,2 kg), 1 wk leegstand
Vleeskuikens 3	E 5.11	Grondstal met luchtmengsysteem en warmtewisselaar	25400	Warmtewisselaar en inlaatventielen zijgevels	Warmtewisselaar en dakventilatoren (11,8 m <sup>3</sup> /h per dier)	37-42 d groei (2,2 kg), 1 wk leegstand
Vleeskuikens 4	E 5.100	Traditionele grondstal	20000	Inlaat ventielen in zijgevels	Ventilatoren in eindgevel (10,7 m <sup>3</sup> /h per dier)	38-42 d groei (2,3 kg), 1 wk leegstand
Vleesvarkens 1	D 3.2.11.2	Ged. roostervloer, mest- en waterkanaal, bolle vloer (60%) en betonroosters, schuine putwanden en rioleringsbuis, >0,95 m <sup>2</sup> per dier, droogvoer	132	Kanaalventilatie	Mechanisch; ventilatiekoker naar centraal kanaal	120 d. groei (23>120 kg), 3 d leegstand

Vleesvarkens 2	D 3.2.11.1	Ged. roostervloer, mest- en waterkanaal, bolle vloer (60%) en metaal/betonroosters, rechte putwanden en rioleringsbuis, <0,8 m <sup>2</sup> per dier, brijvoer	72	Plafondventilatie (strook boven voergang)	Mechanisch; 2 ventilatiekokers naar centraal kanaal	120 d. groei (23>125 kg), 1-2 d leegstand
Vleesvarkens 3	D 3.2.7.2.1	Ged. roostervloer, mest- en waterkanaal, bolle vloer (52%) en betonroosters, schuine putwanden en rioleringsbuis, <0,8 m <sup>2</sup> per dier, droogvoer	210	Voergangventilatie	Dakventilator (105 m <sup>3</sup> /h per dier)	120 d. groei (25>120 kg), 3-4 d leegstand
Vleesvarkens 4	D 3.2.14	Ged. roostervloer, betonroosters, >0,95 m <sup>2</sup> per dier, droogvoer	132	Kanaalventilatie	Mechanisch; ventilatiekoker naar centraal kanaal met chemische luchtwasser	120 d groei (25>125 kg), 3-4 d. leegstand
Zeugen 1	D 1.3.7	Groepshuisvesting met voerligboxen, geen strobed, chemisch luchtwassysteem	328	Inlaatventielen in zijgevels	Mechanisch; ventilatiekoker naar centraal kanaal met chemische luchtwasser	Continue huisvesting
Zeugen 2	D 1.3.9.2	Groepshuisvesting met voerligboxen, geen strobed, schuine putwanden	68	Inlaatventielen in wand centrale gang	Dakventilator (151 m <sup>3</sup> /h per dier)	Continue huisvesting
Biggen 1	D 1.1.100.1	Volledig roostervloer, kunststof roosters, droogvoer	120	Plafondventilatie	Dakventilator (37 m <sup>3</sup> /h per dier)	6 wk groei (6>25 kg), 3 d leegstand
Biggen 2	D 1.1.14.2	Volledig roostervloer, kunststof roosters, droogvoer	375	Plafondventilatie	Mechanisch; ventilatiekoker naar centraal kanaal met chemische luchtwasser	6 wk groei (8>24 kg), 3 d leegstand
Melkkoeien 1	A 1.5.2	Ligboxenstal, 0+4+0 rij-ig, met dichte sleufvloer en mestschuif, geheel onderkelderd, 2 melkrobots	127	Volledig open zijgevels met ventilatiegordijnen	Open nok	Continue huisvesting, permanent opgesteld
Melkkoeien 2	A 1.100.1	Traditionele ligboxenstal, 3+3 rij-ig, met betonroosters en mestkelders, melkput	100 (melkkoeien) + 30 (pinken)	Deels open zijgevels met vogelgaas en ventilatiegordijnen	Open nok met regengoot	Continue huisvesting, met weidegang



---

# Bijlage B: gedetailleerde beschrijving van gebruikte meetmethoden

## B1: bemonstering van inhaleerbaar stof (PM100)

Inhaleerbaar stof (zoals gedefinieerd in EN 481) werd bemonsterd volgens de gravimetrische meetmethode met IOM monsterkoppen (SKC Inc., Pennsylvania, VS) bij een flow van 2 L/min. Deze flow werd gerealiseerd middels een elektropomp (Thomas Industries Inc., model 607CD32, Wabasha, Minnesota, VS). De 25-mm filters werden voor en na bemonstering gewogen om de hoeveelheid (massa) verzameld stof te bepalen. Door deze massa te delen door het totaal door de sampler gehaalde luchtdebiet wordt de massaconcentratie ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$  of  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) bepaald.



De IOM sampler in 'exploded view'. Van links naar rechts: afdekdop, schroefdeksel, filter bewaarhouder (boven), filtercassette (onder; in twee delen), en het samplerhuis met bevestigingsclip en tuit voor de luchtslang

## B2: bemonstering van PM10 en PM2,5

PM10 en PM2,5 werd verzameld op een filter nadat de grotere stofdeeltjes waren afgescheiden met behulp van een PM10 cycloon (model URG-2000-30ENB; URG Corp., Chapel Hill, VS) of PM2,5 cycloon (model URG-2000-30 EG; URG Corp., Chapel Hill, VS). Het stof werd verzameld op glasvezelfilters met een diameter van 47 mm. De filters werden voor en na de stofmonsterneming gewogen onder standaard condities: een temperatuur van  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  en een relatieve luchtvochtigheid van  $50\% \pm 5\%$ . Het verschil in gewicht voor en na de metingen werd gebruikt om de hoeveelheid verzameld stof te bepalen. Lucht werd door de inlaat, cycloon en filter gezogen met monsternempompen (Tecora, Fontenay sous Bois, Frankrijk; model Charlie HV). Deze pompen gebruiken de luchttemperatuur zoals gemeten met een temperatuurvoeler nabij de inlaatkop, en de temperatuur, druk en flow gemeten door de gasmeter binnen in de pomp om de actuele flow aan te passen naar de geprogrammeerde flow. Hierdoor blijft de flow van deze pompen ook constant bij een hoge filterbelading en een bijbehorende toename van de drukval over het filter. Hierdoor werd een stabiele luchtstroom verkregen binnen 2% van de nominale waarde. De pompen werden geprogrammeerd op een flow van  $1,0\text{ m}^3/\text{uur}$  ( $16,7\text{ L}/\text{min}$ ) en op een start- en eindtijd van de monsternemingsperiode. De 24-uursgemiddelde massaconcentratie werd vervolgens bepaald door de massa aan ingevangen stof te delen door het volume bemonsterde lucht, zoals geregistreerd door de gasmeter.

Op basis van de publicatie van Zhao et al. (2009) zijn de volgende correcties zijn uitgevoerd voor PM10: bij  $<222,6\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ :  $[y = 1,0877x]$  of bij  $>222,6\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ :  $[y = 0,8304x + 57,492]$ , waarbij y de gecorrigeerde en x de met cyclonen gemeten concentratie is.

Zowel de temperatuurvoelers als de gasmeters van de pompen werden bij aanvang van het project gekalibreerd en gejusteerd in het Luchtmeetlaboratorium van Wageningen UR Livestock Research.



De complete opstelling voor bemonstering van PM10 (links) en PM2,5 (rechts). Van boven naar beneden bestaat de opstelling uit: inlaatkop met temperatuurvoeler, cycloon, filterhouder, slang, condensatievat en pomp

## B3: Meting deeltjesgrootteverdeling

De grootteverdeling van de stofdeeltjes werd gemeten met een apparaat op basis van lichtverstrooiing (Portable Aerosol Spectrometer, model 1.109; GRIMM Aerosol Technique GmbH & Co. KG, Ainring, Duitsland). Dit apparaat zuigt lucht aan m.b.v. een interne pomp bij een flow van 1,2 L/min. Er vindt geen voorafscheiding plaats; het gehele monster wordt geanalyseerd in een meetkamer. De luchtsnelheid door deze meetkamer wordt zodanig opgevoerd dat er tijdens een meting telkens slechts één deeltje in de meetkamer aanwezig is. In deze kamer wordt het ene deeltje door een laserdiode belicht met een lichtstraaltje (golflengte: 655 nm). Via een spiegel wordt het door het deeltje gereflecteerde licht in een richting buiten de richting van de fotodetector toch naar deze detector gericht. Tevens vindt er ook directe reflectie van het deeltje naar de fotodetector plaats. De fotodetector meet twee variabelen: (1) het aantal deeltjes wordt geteld waarbij elke 'lichtpuls' die de detector bereikt als een deeltje wordt gezien, en (2) de diameter van het deeltje waarbij de lichthoeveelheid (vergelijkbaar met de grootte van de illuminantie of verlichtingssterkte (in lux) in de verlichtingskunde) dat op de detector valt wordt omgezet in een diameter (van een bolvormig deeltje).

Het apparaat wordt door de leverancier gekalibreerd aan een moederapparaat. De kandidaat en het moederapparaat worden daarbij gezamenlijk in een opstelling gebracht waarbij een polydispers aerosol [dolomietstof;  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ] wordt gebruikt. Het moederapparaat is op haar beurt gekalibreerd met diverse monodisperse polystyreen latex aerosolen (latex bolletjes van één bekende diameter en een bekende concentratie). Het apparaat levert daarmee 'optical latex-equivalent diameters' en geen gravimetrische diameters.

Elk geteld deeltje wordt op basis van zijn grootte ingedeeld in één van 30 grootte klassen (size channels) tussen 0,25 en 32  $\mu\text{m}$ . Het apparaat kent nog een 31-ste klasse waarin alle deeltjes groter dan 32  $\mu\text{m}$  worden ingedeeld. Omdat de diameter-bovengrens van deze 31-ste klasse niet door GRIMM is gedefinieerd, zijn de data uit deze klasse niet meegenomen in het bepalen van de deeltjesgrootteverdelingen. Het meetinterval werd ingesteld op 1 seconde en minuutgemiddelden werden gelogd in het geheugen van het apparaat en gedownload voor verdere bewerking en analyse.

De deeltjesconcentraties in de 30 groottekanalen werden omgerekend tot massaconcentraties waarbij de deeltjes beschouwd werden als bolvormig met een diameter gelijk aan het midden van de kanaalbreedte ( $\mu\text{m}$ ) en een uniforme dichtheid van 1,5  $\text{mg}/\text{cm}^3$ . Voor het weergeven van de deeltjesgrootteverdeling in figuren werden deeltjesconcentraties eerst genormaliseerd voor verschillen in kanaalbreedte door de deeltjesconcentraties te delen door de kanaalbreedte waarmee concentraties verkregen werden in aantallen deeltjes per L per  $\mu\text{m}$ .

Voorafgaand aan iedere meting werden de volgende controles en aanpassingen uitgevoerd:

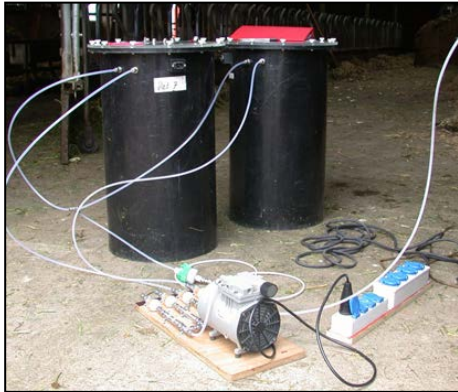
- controle van de juiste interne tijd, indien nodig aanpassing naar de actuele tijd
- controle van het correcte logginginterval (1 min), indien nodig aanpassing
- reiniging van het inlaatbuisje
- controle van de interne filters op vervuiling, indien nodig vervanging
- controle van de meetkamer op vervuiling, indien nodig reiniging door spoelen met lucht



De GRIMM Portable Aerosol Spectrometer, model 1.109

## B4: Luchtbemonstering en meting concentratie CO<sub>2</sub>

Voor het meten van de concentratie van CO<sub>2</sub> werd lucht bemonsterd volgens de longmethode. Bij deze methode wordt een 40 L Nalophan monsterzak in een gesloten vat geplaatst. Door lucht uit het vat te zuigen met behulp van een elektropomp (Thomas Industries Inc., model 607CD32, Wabasha, Minnesota, VS) en een teflon slang, ontstaat in het vat onderdruk en wordt de te bemonsteren lucht aangezogen in de zak. De lucht wordt aangezogen door een kritisch capillair welke de flow reduceert tot een constante luchtstroom van 0,02 L/min gedurende 24 uur. Op deze wijze wordt een 24-uurs luchtmonster verkregen. Het gehalte aan CO<sub>2</sub> (ppm) in het luchtmonster werd bepaald met een gaschromatograaf (Interscience/Carbo Erba Instruments, Breda, Nederland; model GC 8000 Top; kolom: Molsieve 5A; detector: HWD).



Luchtbemonsteringsvaten met slang naar luchtpomp



Gaschromatograaf

## B5: meting minuutwaarden concentratie CO<sub>2</sub>

Minuutwaarden van de concentratie van CO<sub>2</sub> werden bepaald met een meetinstrument met CO<sub>2</sub>-probe (multifunctioneel meetinstrument type 435-4 met IAQ probe voor temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, absolute luchtdruk en CO<sub>2</sub> concentratie; Testo, Almere, Nederland). Deze probe is werkzaam in een meetbereik van 0 tot 10.000 ppm CO<sub>2</sub>, heeft een resolutie van 1 ppm en een nauwkeurigheid van ±75 ppm in het bereik tot 5000 ppm. De concentraties werden opgeslagen in het geheugen van het instrument en gedownload voor het bepalen van profielen in de relatieve concentratie van CO<sub>2</sub>.



Testo multifunctioneel meetinstrument, type 435-4 (links) en IAQ probe (rechts)

---

## B6: temperatuur en relatieve luchtvochtigheid

De temperatuur (T; °C) en relatieve luchtvochtigheid (%) werden gemeten met een gecombineerde logger voor T en RV (Escort iLog; Askey Dataloggers, Leiderdorp, Nederland). Deze kleine loggers (Ø 7,6 cm) werken standalone dankzij een interne batterij. De logger is geschikt voor een meetbereik van -40 tot 70 °C en 0 tot 100% RV. De nauwkeurigheid bedraagt respectievelijk  $\pm 0,25$  °C en  $\pm 3\%$  RV. De start- en stoptijd werden in de logger geprogrammeerd en de meetdata werden na de meting gedownload met de bijbehorende software en basisstation. Om de sensoren voor T en RV te beschermen tegen stof werd een meegeleverd poreus beschermingskapje toegepast. Bij aanvang van het project werden de loggers gekalibreerd in het Luchtmeetlaboratorium van Wageningen UR Livestock Research.



De Escort iLog met display, indicatielampjes en wit beschermkapje over de sensoren

---

# Bijlage C: protocol weging filters en bepaling endotoxinegehalte

## **Weging filters**

De hoeveelheid bemonsterd stof op de filters is bepaald door voor en na de monsternamen de filters te wegen op een microbalans onder voor temperatuur ( $22 \pm 1$  °C) en relatieve luchtvochtigheid ( $34 \pm 5\%$ ) geconditioneerde omstandigheden. De weegprocedure is beschikbaar via de Escape project website (<http://www.escapeproject.eu/manuals/>). De filters zijn gedurende 24 uur voor de weging geacclimatiseerd in de weegkamer. Filters werden voor het wegen ontdaan van statische elektriciteit met behulp van een Pollonium-de-ionisator.

## **Bepaling endotoxinegehalte**

Na de weging is het aanwezige endotoxine op het filter in oplossing gebracht (geëxtraheerd) en de hoeveelheid endotoxine in het extract bepaald volgens NEN:EN 14031, echter zonder toevoeging van 0.05 %Tween20 in het assaymedium zoals aanbevolen door Spaan et al. (2008). Extractie vond plaats door de filters onder a-septische condities over te brengen in een 15 ml Greiner buis. Hieraan werd 5 ml pyrogeenvrij water (Braun) + 0,05 % Tween20 (Merck) toegevoegd, waarna deze gedurende 1 uur geschud werd op een end-over-end roller bij kamertemperatuur. Na centrifugeren gedurende 15 minuten bij 1000 g is het supernatant opgeslagen in pyrogeenvrije glazen buisjes bij -20 °C tot analyse.

Resultaten zijn uitgedrukt als endotoxinen units (EU) per ml extractie vloeistof, welke met behulp van het extractievolume en aangezogen volume lucht omgezet kan worden in de endotoxineconcentratie in de lucht uitgedrukt in endotoxine units (EU) per kubieke meter lucht. Het endotoxinegehalte in het stof (EU/mg) wordt bepaald door de hoeveelheid endotoxine op het filter te delen door de massahoeveelheid stof op het filter.

# Bijlage D: correctiemethode endotoxinegehalte voor achtergrond

De endotoxinegehalten in het stof zoals bemonsterd in de ventilatielucht is gecorrigeerd voor de bijdrage van de buitenlucht, zoals hieronder beschreven.

Daarbij is:

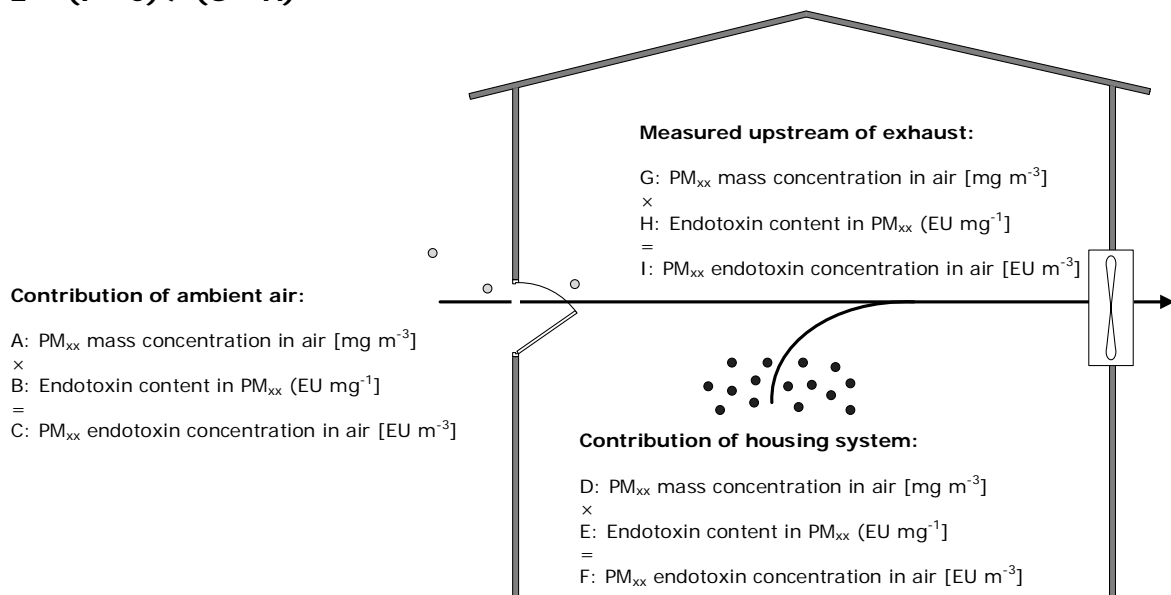
- het endotoxinegehalte in PM<sub>100</sub> zoals gemeten in de ventilatielucht gecorrigeerd voor het in de achtergrond aanwezige PM<sub>10</sub> en het endotoxine daarin;
- het endotoxinegehalte in PM<sub>30</sub> zoals gemeten in de ventilatielucht gecorrigeerd voor het in de achtergrond aanwezige PM<sub>10</sub> en het endotoxine daarin;
- het endotoxinegehalte in PM<sub>10</sub> zoals gemeten in de ventilatielucht gecorrigeerd voor het in de achtergrond aanwezige PM<sub>10</sub> en het endotoxine daarin;
- het endotoxinegehalte in PM<sub>2,5</sub> zoals gemeten in de ventilatielucht gecorrigeerd voor het in de achtergrond aanwezige PM<sub>2,5</sub> en het endotoxine daarin;

Bovenstaande betekent dat de achtergrondcorrectie alleen is uitgevoerd voor het in de achtergrond aanwezige PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub>, inclusief het endotoxine daarin. Verondersteld is dat de achtergronden van stof en endotoxine in de grove PM<sub>30</sub> en PM<sub>100</sub> fracties ten opzichte van de concentraties in de ventilatielucht verwaarloosbaar zijn.

Given:

- General situation:  $(A \times B) + (D \times E) = G \times H$
- A, B, G, and H are measured
- E needs to be determined

$$E = (I - C) / (G - A)$$



# Bijlage E: omstandigheden tijdens de metingen

**Tabel E.1**

*Spreiding van de metingen over het dagnummer in het kalenderjaar en het dagnummer in de productieronde (N.B. De productie van zeugen en melkkoeien is een doorlopend proces en kent geen dagnummers in de productieronde)*

	Dagnr. in jaar			Dagnr. in ronde		
	<i>n</i>	Gem.	Min–Max	<i>n</i>	Gem.	Min–Max
Leghennen	14	209	36–325	14	227	62–396
Vleeskuikens	14	210	63–319	14	32	20–38
Vleesvarkens	14	234	99–328	14	78	33–115
Zeugen	6	275	151–343	-	-	-
Biggen	6	269	145–327	6	35	25–47
Melkkoeien	6	272	139–349	-	-	-

**Tabel E.2**

*Temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en CO<sub>2</sub>-concentratie in de ventilatielucht van de stallen.*

	Temperatuur (°C)			Relatieve luchtvochtigheid (%)			CO <sub>2</sub> (ppm)		
	<i>n</i>	Gem.	Min–Max	<i>n</i>	Gem.	Min–Max	<i>n</i>	Gem.	Min–Max
Leghennen	14	20.6	17.9–25.9	13	67	43–79	14	1401	668–2492
Vleeskuikens	14	22.4	19.5–25.2	12	67	58–78	14	1342	795–2764
Vleesvarkens	14	24.6	22.9–25.5	14	59	49–67	14	1703	696–2820
Zeugen	6	22.1	20.5–25.1	5	75	67–82	6	1432	832–2216
Biggen	6	27.3	25.7–30.8	6	67	62–75	6	2371	1255–3530
Melkkoeien	6	12.7	5.7–22.5	6	89	77–100	6	470	364–549

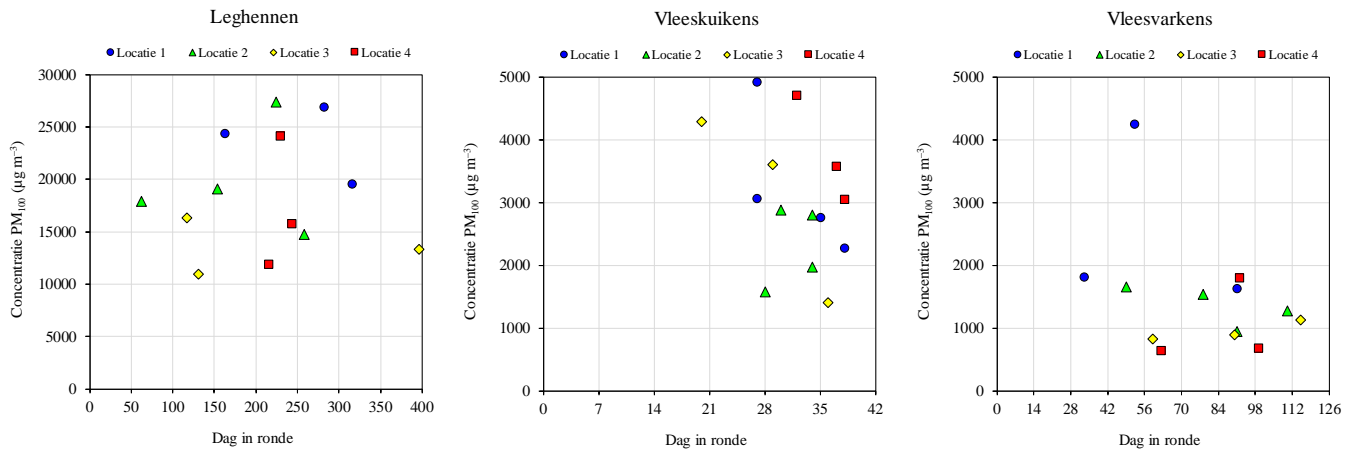
**Tabel E.3**

*Temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en de ‘verre achtergrondconcentratie’ van PM<sub>10</sub> in de buitenlucht (N.B. de eerste twee variabelen zijn feitelijk gemeten buiten de stallen, de derde variabele is verkregen als daggemiddelden via het dichtstbijzijnde meetstation van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit).*

	Temperatuur (°C)			Relatieve luchtvochtigheid (%)			PM <sub>10</sub> (µg m <sup>-3</sup> )		
	<i>n</i>	Gem.	Min–Max	<i>n</i>	Gem.	Min–Max	<i>n</i>	Gem.	Min–Max
Leghennen	14	12.3	0.1–25.1	14	76	47–100	14	15.9	6.7–23.0
Vleeskuikens	13	15.0	4.0–21.3	10	74	55–100	14	17.3	8.1–28.8
Vleesvarkens	14	13.8	3.5–22.3	14	72	45–93	14	18.2	11.1–40.8
Zeugen	5	13.6	8.7–24.8	5	80	60–100	6	19.0	8.3–30.8
Biggen	6	14.4	6.6–30.6	6	74	66–89	6	18.6	9.4–23.3
Melkkoeien	6	11.7	3.5–25.6	6	84	52–100	6	16.5	3.2–30.7

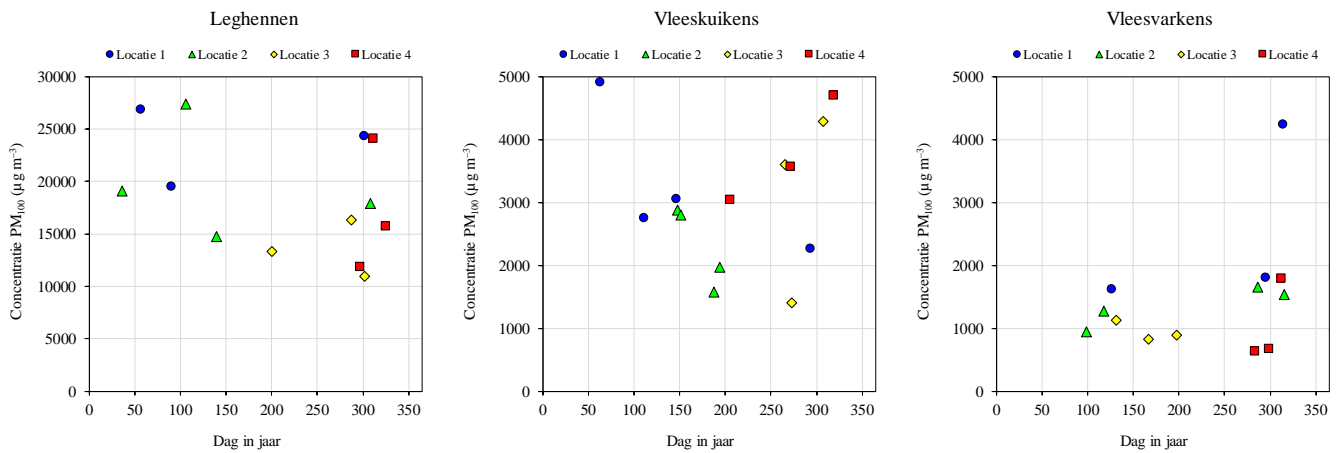


# Bijlage F: scatter plots



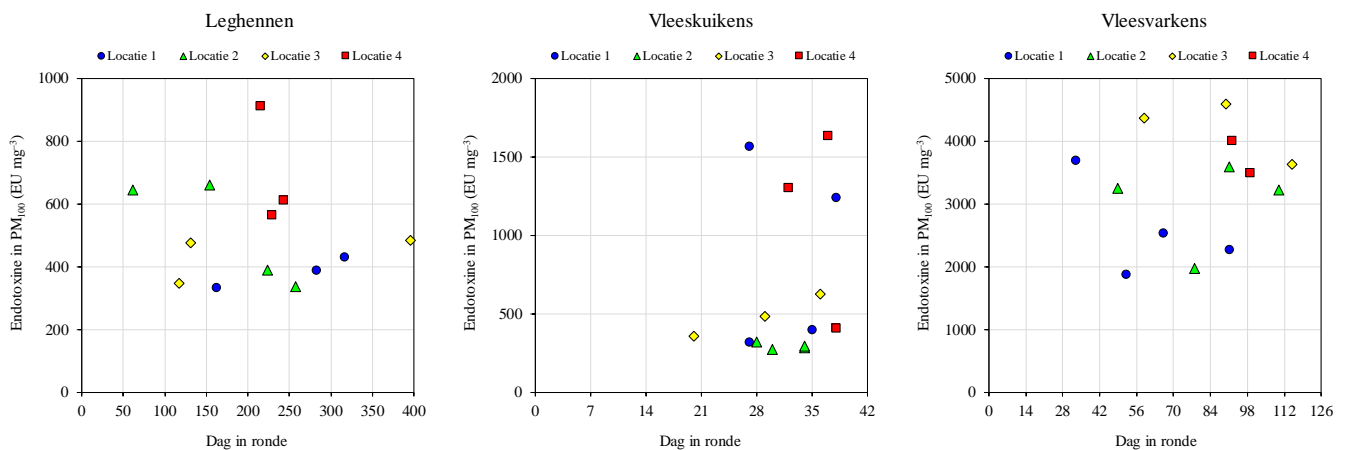
**Figuur F.1**

De concentratie van PM<sub>100</sub> (µg/m<sup>3</sup>) als functie van de dag in de productieronde voor leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens.



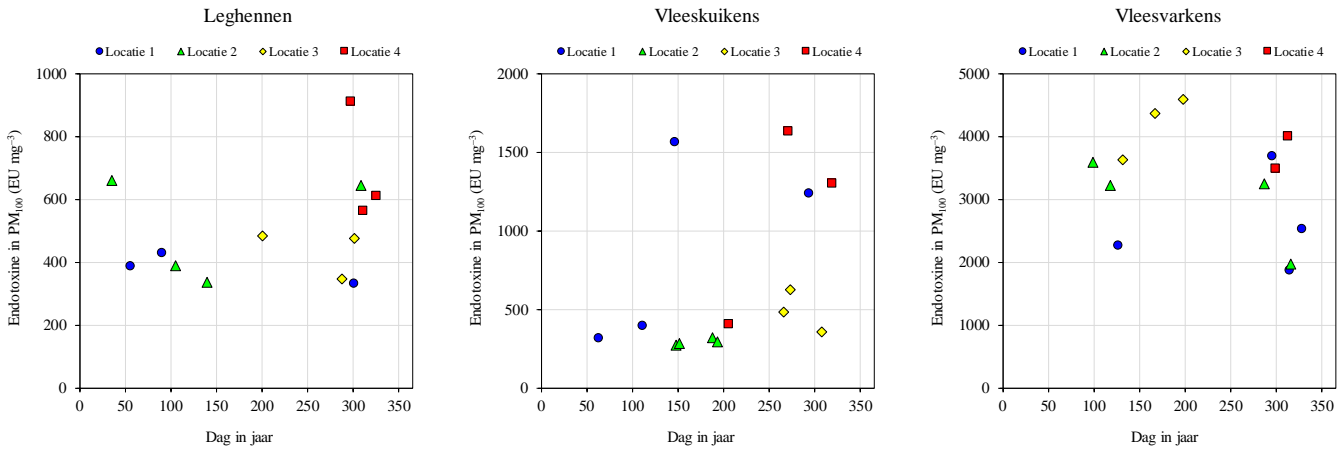
**Figuur F.2**

De concentratie van PM<sub>100</sub> (µg/m<sup>3</sup>) als functie van de dag in het kalenderjaar voor leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens.



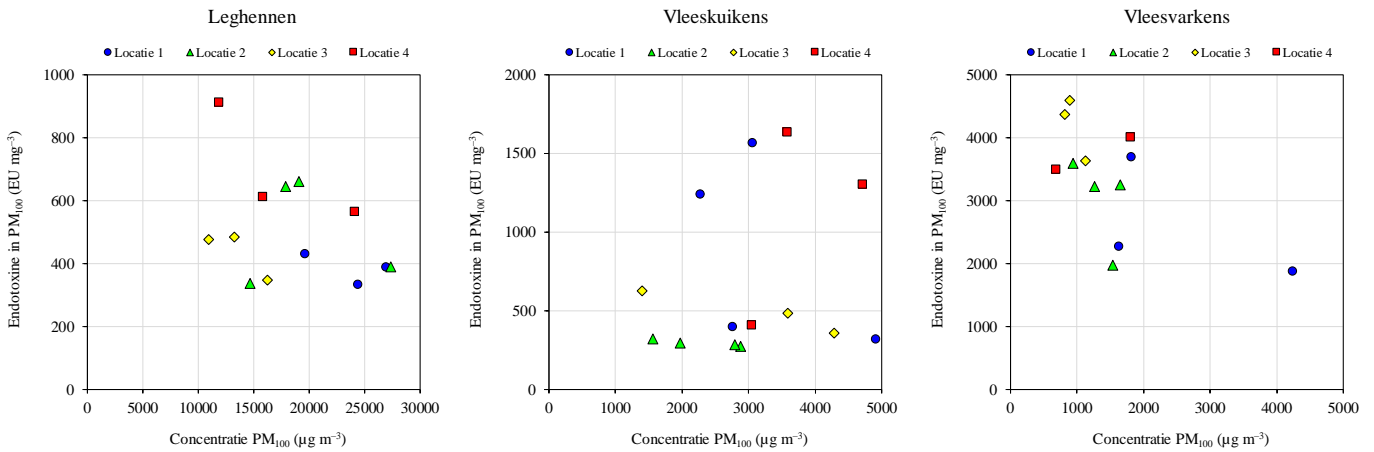
**Figuur F.3**

Het endotoxinegehalte in PM<sub>100</sub> (EU/mg) als functie van de dag in de productieronde voor leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens.



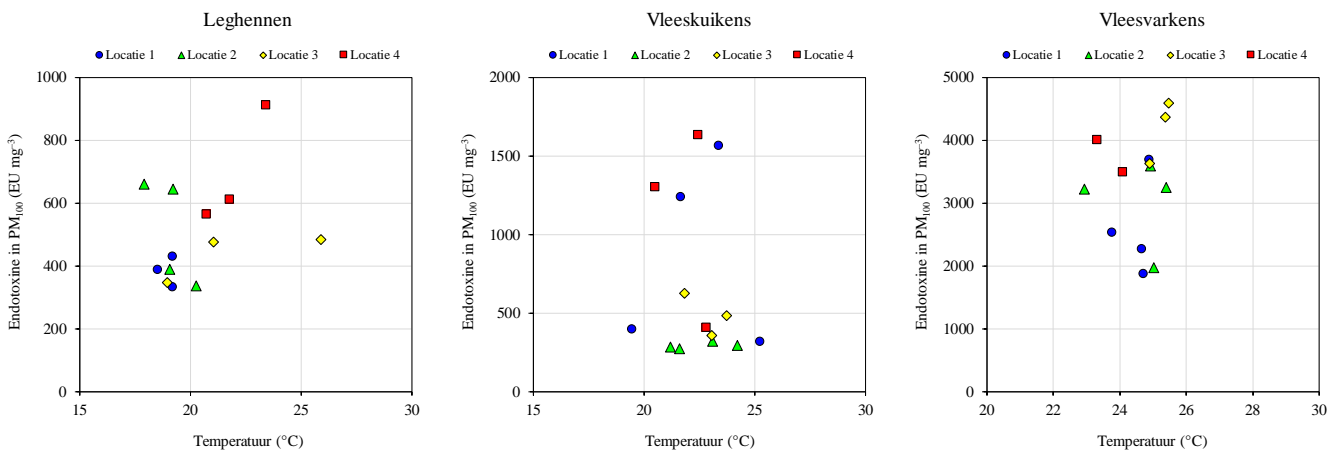
**Figuur F.4**

Het endotoxinegehalte in  $PM_{100}$  (EU/mg) als functie van de dag in het jaar voor leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens.



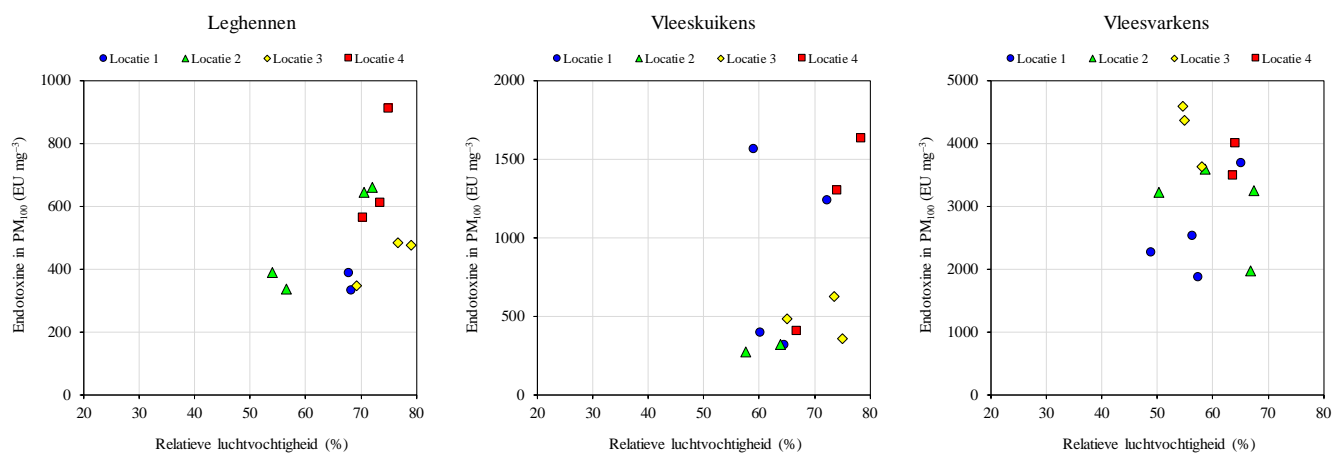
**Figuur F.5**

Het endotoxinegehalte in  $PM_{100}$  (EU/mg) als functie van de concentratie van  $PM_{100}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) voor leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens.



**Figuur F.6**

Het endotoxinegehalte in  $PM_{100}$  (EU/mg) als functie van de temperatuur in de stal ( $^{\circ}\text{C}$ ) voor leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens.



**Figuur F.7**

*Het endotoxinegehalte in PM<sub>100</sub> (EU/mg) als functie van de relatieve luchtvochtigheid in de stal (%) voor leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens.*

---

## Bijlage G: samenstelling klankbordgroep

Jan de Rijk	Ministerie van Infrastructuur en Water
Hans Groot Wassink	Rijkswaterstaat
Rob Scholtens	Provincie Noord-Brabant
Arjan Bossenbroek	Gemeente Barneveld
Aalt den Herder	Nederlandse Vakbond Pluimveehouders (NVP)
Eric Holleman	Producentenorganisatie Varkenshouderij (POV)
Herman Litjens	ZLTO, LTO Nederland
Renske Nijdam	GGD Brabant
Fred Stouthart	Omgevingsdienst Zuidoost-Brabant
Frank Toemen	Omgevingsdienst De Vallei
Rik van der Weerd	GGD Gelderland-Midden
Isabelle Wever	Vereniging Nederlandse Gemeenten



To explore  
the potential  
of nature to  
improve the  
quality of life



---

Wageningen Livestock Research Postbus 338  
6700 AH Wageningen  
T 0317 48 39 53  
E [info.livestockresearch@wur.nl](mailto:info.livestockresearch@wur.nl) [www.wur.nl/  
livestock-research](http://www.wur.nl/livestock-research)

Wageningen Livestock Research ontwikkelt kennis voor een zorgvuldige en renderende veehouderij, vertaalt deze naar praktijkgerichte oplossingen en innovaties, en zorgt voor doorstroming van deze kennis. Onze wetenschappelijke kennis op het gebied van veehouderijsystemen en van voeding, genetica, welzijn en milieu-impact van landbouwhuisdieren integreren we, samen met onze klanten, tot veehouderijconcepten voor de 21e eeuw.

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.500 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

