

Validatie van het atmosferisch verspreidingsmodel Stacks voor stofdeeltjes en endotoxinen uit een pluimveebedrijf

Validation of the atmospheric dispersion model Stacks for particulate matter and endotoxins from a poultry farm

OPENBAAR
Rapport 1255

J.J. Erbrink, A. Winkel, I.M. van Schothorst, J.W.H. Huis in 't Veld, I.M. Wouters, D.J.J. Heederik, N.W.M. Ogink



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Validatie van het atmosferisch verspreidingsmodel Stacks voor stofdeeltjes en endotoxinen uit een pluimveebedrijf

Validation of the atmospheric dispersion model Stacks for particulate matter and endotoxins from a poultry farm

Auteurs

J.J. Erbrink¹, A. Winkel², I.M. van Schothorst³, J.W.H. Huis in 't Veld², I.M. Wouters³, D.J.J. Heederik³, N.W.M. Ogink²

¹ *Erbrink Stacks Consult*

² *Wageningen Livestock Research, Wageningen University and Research*

³ *Institute for Risk Assessment Sciences, Universiteit Utrecht*

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen het kader van het Beleidsondersteunend onderzoek (thema 'Verminderen fossiele nutriënten, water en stikstofdepositie', projectnummer BO-43-101-025) van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Voedselkwaliteit, met financiering van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Wageningen, juni 2021

Openbaar

Rapport 1255

J.J. Erbrink, A. Winkel, I.M. van Shothorst, J.M.W. Huis in 't Veld, I.M. Wouters, D.J.J. Heederik, N.W.M. Ogink, 2021. *Validatie van het atmosferisch verspreidingsmodel Stacks voor stofdeeltjes en endotoxinen uit een pluimveebedrijf [Validation of the atmospheric dispersion model Stacks for particulate matter and endotoxins from a broiler farm]*. Wageningen Livestock Research; Erbrink Stacks Consult; Institute for Risk Assessment Sciences, Universiteit Utrecht. Wageningen Livestock Research Openbaar Rapport 1255.

Synopsis In dit onderzoek is het atmosferische verspreidingsmodel Stacks gevalideerd aan metingen bovenwinds (achtergrond), in de stallen (modelinput), en benedenwinds van een pluimveebedrijf geïsoleerd gelegen in een relatief schone omgeving aan de kust van Noord-Nederland. De validatie is gedaan voor Total Suspended Particles (TSP), fijnstof (PM₁₀), de endotoxinen in de TSP fractie, en voor gasvormig ammoniak. Daarbij werd met name beoogd inzicht te krijgen in effecten van stalgeometrie, warmte-emissie en depositie (met name sedimentatie) van deeltjes. Het model voorspelde relatief kleine bijdragen van de stallen aan de benedenwindse concentraties van (fijn)stof en endotoxinen op de afstanden van de meetlocaties (125-835 m). Tijdens de meetcampagne van circa drie weken is de stalbijdrage voor die componenten bovenop de achtergrondconcentratie niet of nauwelijks zichtbaar gebleken. Het model voorspelde eveneens relatief kleine bijdragen van de stallen aan de benedenwindse concentraties van ammoniak, afnemend met de afstand vanaf de stallen. Het gemodelleerde niveau en trend in de stalbijdrage voor ammoniak werd in de veldmetingen ook gemeten. De verkregen data van de veldmetingen bevatten te weinig hoge en lage bijdragen om een goede modelvalidatie uit te voeren. De mogelijke oorzaken voor deze resultaten worden in dit rapport bediscussieerd. Om alsnog het beoogde inzicht in de betrouwbaarheid van het Stacks model voor atmosferische verspreiding van luchtverontreiniging uit stalgebouwen te verkrijgen wordt aanbevolen dit onderzoek te herhalen waarbij de ervaringen en verbeterpunten opgedaan in dit onderzoek worden benut.

Abstract In this study, the atmospheric dispersion model Stacks was validated against measurements upwind of (background), inside (model input), and downwind of a broiler farm isolated in a relatively clean environment near the coast line in the north of the Netherlands. The validation was done for Total Suspended Particles (TSP), fine dust (PM₁₀), endotoxins in the TSP fraction, and gaseous ammonia. The main aim was to gain insight into the effects of barn geometry, heat emission and deposition (especially sedimentation of particles). The model predicted relatively small contributions of the barns to concentrations of PM and endotoxins at the measurement locations downwind from the farm (125-835 m). During the measurement campaign of approximately three weeks, this contribution was not or hardly visible above the background concentration in the field measurements. The model also predicted relatively small contributions of the barns to concentrations of ammonia with a decreasing trend with distance from the farm. The model predicted level and trend in the barn contribution to the ammonia concentration was also visible in the data from the field measurements. The dataset obtained contained little variation, low and high barn contributions, to allow a proper model validation. Possible explanations for the results are discussed in this report. To gain insight into the reliability of the Stacks model, it is recommended to repeat the present study taking into account the experiences and points for improvement from this work.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/549141> of op www.wur.nl/livestock-research (onder Wageningen Livestock Research publicaties).



Dit werk valt onder een Creative Commons Naamsvermelding-Niet Commercieel 4.0 Internationaal-licentie.

© Wageningen Livestock Research, onderdeel van Stichting Wageningen Research, 2021
De gebruiker mag het werk kopiëren, verspreiden en doorgeven en afgeleide werken maken. Materiaal van derden waarvan in het werk gebruik is gemaakt en waarop intellectuele eigendomsrechten berusten, mogen niet zonder voorafgaande toestemming van derden gebruikt worden. De gebruiker dient bij het werk de door de maker of de licentiegever aangegeven naam te vermelden, maar niet zodanig dat de indruk gewekt wordt dat zij daarmee instemmen met het werk van de gebruiker of het gebruik van het werk. De gebruiker mag het werk niet voor commerciële doeleinden gebruiken.

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.

Wageningen Livestock Research is NEN-EN-ISO 9001:2015 gecertificeerd.

Op al onze onderzoeksopdrachten zijn de Algemene Voorwaarden van de Animal Sciences Group van toepassing. Deze zijn gedeponneerd bij de Arrondissementsrechtbank Zwolle.

Inhoud

Woord vooraf	5
Samenvatting	7
1 Inleiding	11
1.1 Voorgeschiedenis	11
1.1.1 Het toetsingskader voor fijnstof uit veehouderijen	11
1.1.2 Gezondheidsstudies bij omwonenden van veehouderijen	11
1.1.3 Ontwikkeling van een toetsingskader op basis van endotoxine-emissies	11
1.1.4 De studie "Risicomodellering Veehouderij en Gezondheid"	12
1.2 Eerdere validaties van Stacks	12
1.3 Doelstelling en hoofdlijnen van dit onderzoek	13
1.4 Dit rapport	14
2 Methodologie	15
2.1 Beschrijving vleeskuikenbedrijf en omliggend gebied	15
2.2 Hoofdlijnen van het onderzoek	16
2.3 Metingen	17
2.3.1 Metingen van concentraties en ventilatiedebiet in de stallen	17
2.3.2 Berekening van werkelijke emissies uit de stallen als modelinvoer	18
2.3.3 Metingen lokale meteorologie	18
2.3.4 Bovenwindse en benedenwindse luchtmetingen in het veld	18
2.4 Invoergegevens en uitgangspunten modellering	20
2.4.1 Gebouwworm, uitstroomsnelheid, emissiepunten en verdiscontering warmtewisselaars	20
2.4.2 Deeltjes uit de stallen: deeltjesgrootteverdeling en endotoxinegehalten	21
2.4.3 Depositie van grotere stofdeeltjes	22
2.4.4 Omgevingsruwheid	22
2.4.5 Meteorologie	22
2.5 Vergelijking van modeluitkomsten met veldmetingen	24
3 Resultaten	25
3.1 Pilotmeting aan de deeltjespluim uit de stallen	25
3.2 Emissies van stof, endotoxinen en ammoniak	26
3.3 Meteorologie	26
3.4 PM ₁₀ : stalinvloed en vergelijking met modelberekening	27
3.5 TSP: stalinvloed en vergelijking met modelberekening	32
3.6 Endotoxinen: stalinvloed en vergelijking met modelberekening	33
3.7 Ammoniak: stalinvloed en vergelijking met modelberekening	35
4 Discussie, conclusies, aanbevelingen	39
4.1 Doel, werkwijze en hoofdbevinding	39

4.2	Resultaten, verklaringen en conclusies op deelaspecten	39
4.3	Eindconclusie en aanbeveling	40
	Geciteerde bronnen	41
	Bijlage A: overzicht validatiestudies Stacks en OPS	43
	Bijlage B: beschrijving meetlocatie	45
	Bijlage C: resultaten stalmetingen als modelinvoer	52
	Bijlage D: ammoniakconcentraties LML tijdens meetcampagne	61

Woord vooraf

Deze onderzoeksopdracht is uitgevoerd binnen het kader van het Beleidsondersteunend onderzoek van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Voedselkwaliteit, met financiering van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Het rapport is samengesteld door een team van medewerkers van Wageningen Livestock Research, Erbrink Stacks Consult en IRAS Universiteit Utrecht. Een deel van de veldmetingen in deze studie is uitgevoerd door TNO.

Onze dank gaat uit naar de pluimveehouder op wiens bedrijfslocatie deze studie mocht worden uitgevoerd. Ook danken we de omwonenden van het bedrijf welke toestemming gaven om veldmetingen uit te voeren op hun percelen en hun woonlocatie beschikbaar stelden om elektriciteit voor de veldmetingen af te nemen. De vriendelijkheid en behulpzaamheid van alle betrokkenen maakte de uitvoering van deze studie zeer prettig.

Tot slot danken we dr. Marina Sterk en dr. Addo van Pul van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu voor het becommentariëren van de conceptversie van dit rapport.

Namens de auteurs,

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

Samenvatting

Aanleiding en doel

Om omwonenden te beschermen tegen de nadelige effecten van veehouderijemissies is sinds 2013 in opdracht van de rijksoverheid onderzocht of een toetsingskader voor endotoxinen kan worden ontwikkeld. In dat onderzoeksprogramma zijn endotoxine-emissiefactoren bemeaten voor een zestal belangrijke diercategorieën. Ook is het atmosferisch verspreidingsmodel Stacks geschikt gemaakt voor deeltjes-gebonden endotoxinen; dit basismodel conform het Nieuw Nationaal Model (NNM) wordt tevens gebruikt voor toetsing op fijnstof (de variant ISL3a) en geur (de variant V-Stacks vergunningen) uit stalgebouwen. De aanpak van emissiefactoren, atmosferisch verspreidingsmodel en grenswaarde dient de werkelijkheid voldoende accuraat te beschrijven. Het Stacks model is echter nog niet eerder gevalideerd aan metingen van (fijn)stof en endotoxinen rond een stalbron. Het doel van dit onderzoek was daarom het verkrijgen van inzicht in de mate van betrouwbaarheid van Stacks voor modellering van stofdeeltjes (PM₁₀ oftewel fijnstof; maar daarnaast alle fracties tot PM₁₀₀), het endotoxine daarin en gasvormig ammoniak. Daarbij werd beoogd te focussen op de invloed van warmte-emissie, stalgeometrie en depositie van grotere deeltjes (groter dan 10 micrometer diameter).

Werkwijze

De validatie is uitgevoerd bij een pluimveebedrijf in Noord-Nederland gelegen op circa 1 km ten oosten van de kust en zonder andere stalbronnen in de directe omgeving. Het bedrijf bestond uit twee moderne, representatief uitgeruste stallen met elk 29.000 vleeskuikens. Van beide stallen zijn de emissies van stofdeeltjes (PM₁₀₀, PM₃₀ en PM₁₀), de endotoxinen in voornoemde fracties, en ammoniak zoveel mogelijk continu gemonitord. In de nabije omgeving van de stallen is een meetmast geplaatst om de lokale meteorologie vast te leggen. Bovenwinds (d.w.z. ten zuidwesten) van de stallen zijn de achtergrondconcentraties bepaald van Total Suspended Particles (TSP; en het endotoxine daarin), PM₁₀ en ammoniak. Deze componenten zijn ook bepaald op 6 posities in een rechte lijn benedenwinds van de stallen (in noordoostelijke richting, 240 graden; op 125, 200, 370, 465, 680 en 835 m; voor ammoniak ook nog op tussenliggende punten). De meetcampagne vond plaats tussen 21 februari 2019 13:00 uur en 13 maart 2019 08:00 uur en besloeg in totaal 476 uren. Uren met windrichtingen tussen 220 en 260 graden werden beschouwd als bruikbaar: dit bedroegen 133 uren. Bij deze windrichtingen stroomde de lucht over het achtergrondmeetpunt, over de stallen en langs de rechte lijn met benedenwindse meetpunten. Na afloop van de meetcampagne zijn de metingen van de lokale meteorologie en de emissie van de stallen ingevoerd in het Stacks model. Ook gebouwworm, uitstroomsnelheid, emissiepunten, terreinruwheid en warmte-emissie werden in het model gedefinieerd. De uitkomsten van het model zijn vergeleken met de benedenwindse veldmetingen. Door de meetcampagne in de laatste drie weken van de groeicyclus uit te voeren, is bereikt dat de bronsterkte van het bedrijf zo hoog mogelijk was. Door de meetcampagne in februari/maart uit te voeren is geprobeerd 'kritieke situaties' op te zoeken met een stabiele opbouw van de atmosfeer met minimale verdunning van luchtverontreiniging.

Hoofdconclusie en aanbeveling

De in dit onderzoek verkregen dataset van veldmetingen laat weinig toe om uitspraken te doen over de betrouwbaarheid van het Stacks model voor emissies uit stalgebouwen. Voor een goede modelvergelijking moeten de metingen voldoende spreiding (zowel hoge als lage bijdragen) laten zien. In dit onderzoek zijn geen (TSP, endotoxinen, PM₁₀) of relatief lage (ammoniak) bijdragen gevonden van het pluimveebedrijf op de benedenwindse concentraties. Het Stacks model voorspelde ook lage bijdragen. De modelkwaliteit is daarmee niet weersproken maar tegelijk onvoldoende aangetoond. Om alsnog het beoogde inzicht in de betrouwbaarheid van het Stacks model te verkrijgen wordt aanbevolen dit onderzoek te herhalen waarbij de ervaringen en verbeterpunten opgedaan in dit onderzoek worden benut.

De ervaringen en verbeterpunten voor de methodologie in toekomstig onderzoek zijn:

- Een groter bedrijf nemen: 2 stallen met samen 58.000 vleeskuikens is benedengemiddeld qua omvang (ca. 90.000 kuikens) en daarmee qua bronsterkte in het landschap. Een bedrijf van gemiddelde tot bovengemiddelde omvang zal beter zichtbaar worden in veldmetingen.
- Een leghennenbedrijf nemen: de emissie van een vleeskuikenbedrijf stijgt exponentieel van nul in de eerste dagen tot maximaal aan het einde van de groeiperiode van circa 7 weken. Daarna is de emissie afwezig gedurende de leegstandsperiode van circa 2 weken. Zo ontstaat een zaagtandpatroon in emissie door het jaar. Bij leghennenstallen is de emissie constant hoog. Daarnaast is de stof- en endotoxine-emissie per dierplaats groter waarmee eveneens gemakkelijker een grotere bronsterkte in het landschap wordt verkregen (zie eerste bullet)
- Het 24-uurspatroon in stofemissie vaker bepalen: in dit onderzoek is dit patroon op zes van de 21 dagen bepaald en voor de overige dagen verkregen via inter-/extrapolatie. Door dit vaker te doen, kan de nauwkeurigheid van de bronsterkte van het bedrijf verder worden vergroot.
- Voor alle stoffracties en ammoniak geldt dat in toekomstig onderzoek idealiter zou worden overgestapt op meer analytische meetmethoden met hoge gevoeligheid in het lage bereik en – voor ammoniak – daarnaast ook een hogere tijdsresolutie. Gedacht moet worden aan de apparatuur welke ook in het LML wordt ingezet (de Fidas-monitor voor PM en de mini-DOAS voor ammoniak). Dit vergt echter een forse inzet van dure en beperkt beschikbare apparatuur.
- Een meetcampagne over langere tijd uitvoeren (bijvoorbeeld 3-6 maanden). Hiermee wordt de kans verkleind dat hoge windsnelheden of andere (meettechnisch) versturende factoren prominent in de dataset aanwezig zijn of kunnen deze perioden worden geëxcludeerd uit de definitieve dataset.

Resultaten en conclusies op deelaspecten

Ten aanzien van de monitoring van de meteorologie en stalemissies als modelinput:

- De lokaal gemeten meteorologie kwam goed overeen met de meteorologie van het dichtstbijzijnde KNMI meetstation. Dit betekent dat in dit onderzoek de juiste perioden (met de benodigde windrichting) zijn geselecteerd.
- Tijdens de 133 bruikbare uren met zuidwestelijke windrichtingen was de windsnelheid vrij hoog: gemiddeld 8,2 m/s (5 Bft) met de hoogste uurwaarde 14,4 m/s (7 Bft).
- De ventilatiedebieten, concentraties van stof en ammoniak, en de emissies van deze stoffen (Bijlage C) lagen in lijn met de verwachting op basis van de emissiefactoren en waren consistent met de kennis over emissie bij vleeskuikens. De in dit onderzoek vastgestelde emissies van stoffen hebben het stalgebouw via de ventilatorkokers verlaten.
- Het gehalte van endotoxine in het stof uit het bedrijf lag aanzienlijk lager (namelijk een factor 4) dan vastgesteld voor vier vleeskuikenbedrijven in de meetcampagne van Winkel et al. (2018). Het lage endotoxinegehalte in het stof was reproduceerbaar in de tijd en tussen beide stallen van het bedrijf. Op basis van de bestaande kennis over endotoxine-emissies uit stallen lijkt het bemeten bedrijf een zeer lage endotoxine-emissie te hebben gehad.

Ten aanzien van de bovenwindse en benedenwindse veldmetingen:

- De stalbijdrage aan de benedenwindse concentraties van TSP, de endotoxinen daarin, en PM₁₀ was weinig of niet zichtbaar in de veldmetingen.
- De hoge windsnelheid in de 133 bruikbare uren met zuidwestelijke wind kan de veldmetingen van TSP en PM₁₀, en daarmee endotoxinen, beïnvloed hebben. Het is mogelijk dat deeltjes bij deze hoge windsnelheden verminderd zijn ingevangen door respectievelijk de TSP-inlaat en de AirBoxen.
- De variatie in PM₁₀ meetwaarden van de verschillende AirBoxen was groter dan de berekende stalbijdrage. M.a.w. vermoedelijk is er gezocht naar verschillen tussen bovenwindse en benedenwindse PM₁₀ concentraties welke niet of nauwelijks boven de toevalsvariatie (meetruis) van de AirBoxen uitkwamen.
- Hoewel de stal verwacht werd als geïsoleerde stal in een schone omgeving te liggen, bleken alle achtergrondconcentraties relatief hoog te zijn ten opzichte van de stalbijdragen. Ondanks de afwezigheid van stallen binnen 1 km van de meetlocatie en het vooraf wegnemen van mogelijk versturende bijkomende bronnen op het bedrijfsterrein, kan niet helemaal uitgesloten worden dat de veldmetingen zijn beïnvloed door bijkomende lokale bronnen.

Ten aanzien van de vergelijking van de modelvoorspellingen met veldmetingen:

- De modelberekeningen voorspelden een stalbijdrage aan de PM₁₀-concentratie tot maximaal circa 5 µg/m³ op 125 m, 1,5 µg/m³ op 200 m en 0,9 µg/m³ op 370 m benedenwinds van de stallen (ter vergelijking: de concentratie van PM₁₀ in Nederland is jaargemiddeld ongeveer 20 µg/m³). Voor TSP berekende het model logischerwijze hogere massaconcentraties, maar ook deze bedroegen voor de doorgerekende omstandigheden maximaal 5 tot 8 µg/m³ (meetpunt 200 m). Deze bijdragen zijn in de metingen niet zichtbaar geworden. Voornoemde beperkte stalbijdragen op de gegeven afstanden vanaf 125 m zijn in lijn met de bijdragen gerapporteerd in de wetenschappelijke literatuur.
- De ammoniakconcentraties waren zowel in de meetresultaten als bij de modelberekeningen lager dan 5 µg/m³ vanaf afstanden meer dan 100 m (ter vergelijking: de concentratie van ammoniak in Nederland is jaargemiddeld 5-10 µg/m³). Dichtbij de stal (binnen 100 m) was de stalbijdrage in de metingen ook niet meer dan 5 µg/m³ terwijl de modelresultaten licht hogere waarden tonen. Mogelijk dat de gebouwinvloed iets sterker is dan het model aanneemt.
- De gemeten endotoxineconcentraties overstegen nooit het niveau van 1 EU/m³ en waren dus zeer laag. De gemodelleerde waarden lagen eveneens dicht bij nul.

1 Inleiding

1.1 Voorgeschiedenis

1.1.1 Het toetsingskader voor fijnstof uit veehouderijen

Stallen vormen in Nederland een belangrijke emissiebron van stofdeeltjes. Van het totaal door de mens uitgestoten (antropogeen) fijnstof (PM₁₀; deeltjes kleiner dan 10 micrometer aerodynamische diameter) kwam in Nederland in 2018 naar schatting ongeveer 14% uit stallen voor kippen, 3% uit stallen voor varkens en 1% uit stallen voor rundvee (Emissieregistratie, 2020). Met de komst van de Europese luchtkwaliteitsrichtlijn 2008/50/EC die grenswaarden stelt aan de concentraties van fijnstof in de buitenlucht, alsook het Nationaal Samenwerkingsprogramma Luchtkwaliteit (2009), werd fijnstof een nieuwe luchtverontreinigingscomponent voor de Nederlandse veehouderij. In de jaren 2007-2009 is een fijnstof toetsingskader voor veehouderij ontwikkeld. Bij nieuwbouw, wijziging of uitbreiding van een stal moet met dit toetsingskader worden vastgesteld of de grenswaarden uit voornoemde richtlijn niet worden overschreden ter hoogte van gevoelige punten rond het veehouderijbedrijf, zoals een woning. Dit toetsingskader bestaat uit drie componenten: a) emissiefactoren voor fijnstof (vastgelegd in de "Lijst Emissiefactoren fijn stof voor veehouderij" behorende bij de Regeling beoordeling luchtkwaliteit), b) het atmosferisch verspreidingsmodel *ISL3a* (een variant van *Stacks*) en c) de voornoemde grenswaarden die op nationaal niveau zijn vastgelegd in de Wet milieubeheer. Een soortgelijk toetsingskader bestaat er voor geuremissies uit stallen. Hier zijn de emissiefactoren vastgelegd in de Regeling geurhinder en veehouderij en wordt er gerekend met het model *V-Stacks vergunning*, eveneens een variant van *Stacks*.

1.1.2 Gezondheidsstudies bij omwonenden van veehouderijen

Het toetsingskader voor fijnstof is aanvankelijk ingesteld om te kunnen voldoen aan de generieke grenswaarden voor fijnstof uit de richtlijn 2008/50/EC, uitgaande van de veronderstelling dat alle fijnstof potentieel schadelijk is voor de volksgezondheid, ook de deeltjes uit stallen. In tegenstelling tot deeltjes uit industriële en verbrandingsprocessen, zijn deeltjes uit stallen van organische oorsprong (mest, veren, huid, haar, voer, enzovoort), relatief grof (met name groter dan 3 á 4 micrometer aerodynamische diameter) en rijk aan virussen, schimmels, bacteriën en bacteriële stoffen zoals endotoxinen (celwandfragmenten van Gram-negatieve bacteriën). Vanaf ongeveer 2011 werden de eerste inzichten verkregen in effecten van veehouderijemissies op de gezondheid van omwonenden. Het gaat dan om de studies Intensieve Veehouderij en Gezondheid (IVG: Heederik et al., 2011), Veehouderij en Gezondheid Omwonenden 1 (VGO-1; Maassen et al., 2016), VGO-2 (Hagenaars et al., 2017) en VGO-3 (IJzermans et al., 2018; Smit et al., 2020). In deze studies is een aantal associaties gevonden tussen het wonen nabij stallen en de gezondheid die wijzen op nadelige effecten (zoals meer longontstekingen, een lagere longfunctie en meer klachten en een hoger medicijngebruik bij COPD patienten) en beschermende effecten (zoals minder astma en allergieën).

1.1.3 Ontwikkeling van een toetsingskader op basis van endotoxine-emissies

Om omwonenden te beschermen tegen de nadelige effecten van veehouderijemissies is sinds 2013 in opdracht van de rijksoverheid door de auteurs van dit rapport onderzocht of een toetsingskader voor endotoxinen kan worden ontwikkeld en toegepast bij het verlenen van de omgevingsvergunning milieu die vereist is bij nieuwbouw, wijziging of uitbreiding van een stal (Rijksoverheid, 2013). De keuze voor endotoxinen komt voort uit het feit dat endotoxine vrij specifiek is voor stalstof, een belangrijke maat is voor de belasting van de omgeving met bioaerosolen uit de veehouderij in het algemeen, waarschijnlijk een rol speelt bij de totstandkoming van gezondheidseffecten, en een kwantitatief toetsingskader mogelijk maakt (Gezondheidsraad, 2012). In fase 1 en 2 van dit onderzoeksprogramma is een literatuurstudie uitgevoerd naar de stand van kennis rondom endotoxine-emissies uit de veehouderij en zijn de mogelijkheden voor het ontwikkelen van een endotoxine toetsingskader verkend (Winkel et al., 2014). In fase 3a is een eerste set emissiefactoren

verkregen door metingen uit te voeren van de emissie van endotoxinen in de stoffracties PM₁₀₀, PM₁₀ en PM_{2,5} uit stallen voor leghennen, vleeskuikens en vleesvarkens. Een atmosferisch verspreidingsmodel voor endotoxinen is verkregen door een variant van het Stacks model hiervoor geschikt te maken (welke ook reeds gebruikt wordt voor fijnstof en geur). Uit scenarioberekeningen met voornoemde emissiecijfers en verspreidingsmodel bleek dat endotoxineconcentraties rondom stallen hoger kunnen worden dan de grenswaarde van 30 Endotoxine Units (EU) per kubieke meter lucht zoals voorgesteld door de Gezondheidsraad (Gezondheidsraad, 2012), ook wanneer voldaan wordt aan bestaande toetsingskaders voor geur en PM₁₀ (Ogink et al., 2016). In fase 3b van het onderzoeksprogramma, tenslotte, is de eerste set emissiecijfers uitgebreid, zowel voor de reeds bemeten diercategorieën als voor zeugen, gespeende biggen en melkkoeien (Winkel et al., 2018). Na het derde deel van het onderzoeksprogramma waren de basiscomponenten voor het toetsingskader – emissiecijfers per diercategorie, een atmosferisch verspreidingsmodel en een grenswaarde om de modeluitkomst aan te toetsen – gereed.

1.1.4 De studie “Risicomodellering Veehouderij en Gezondheid”

In de studie Risicomodellering Veehouderij en Gezondheid (Heederik et al., 2019) zijn voornoemde endotoxine emissiecijfers en het aangepaste Stacks model benut om endotoxine concentratiekaarten te maken voor een veehouderijdicht gebied in oostelijk Noord-Brabant (het VGO-onderzoeksgebied). Hieruit is gebleken dat de door de Gezondheidsraad voorgestelde grenswaarde voor endotoxine van 30 EU/m³ (als 99,5-percentiel) op circa 2% van het oppervlak van het gebied wordt overschreden. Verder zijn PM₁₀- en endotoxineconcentraties gemodelleerd voor de woonadressen van deelnemers aan het medisch onderzoek in de VGO-studie. Blootstelling-responsrelaties zijn geanalyseerd door de gemodelleerde jaargemiddelde PM₁₀- en endotoxineconcentraties in de lucht op het woonadres te koppelen aan gezondheidsgegevens die verzameld zijn in het medisch onderzoek van de VGO-studie (luchtwegklachten, longfunctie, allergische sensibilisatie); dit als aanvulling op eerdere analyses met eenvoudiger proxies voor veehouderij gerelateerde blootstelling zoals de afstand tot veehouderijbedrijven en dichtheid van veehouderijbedrijven rond het woonadres. Uit dit deel van het RVG-onderzoek is gebleken dat gemodelleerde endotoxine concentraties in het algemeen beter correleren met gezondheidseffecten dan gemodelleerde PM₁₀-concentraties.

Op 13 juni 2019 heeft de staatssecretaris van Infrastructuur en Waterstaat de rapporten over de uitgebreide set endotoxine emissiecijfers (Winkel et al., 2018) en over de studie “Risicomodellering Veehouderij en Gezondheid” (Heederik et al., 2019) aan de Tweede Kamer gestuurd, voorzien van een beleidsreactie. De staatssecretaris geeft in haar kamerbrief aan dat het endotoxine toetsingskader niet verder wordt ingesteld als extra toetsingskader naast die voor fijnstof en geur. Wel wordt in de brief aangegeven dat de emissiecijfers en het verspreidingsmodel voor endotoxinen door regionale overheden kunnen worden ingezet om gebieden te identificeren waar overschrijding van een endotoxine grenswaarde te verwachten is (hotspotgebieden) zodat daar via technische en ruimtelijke maatregelen de concentratie endotoxinen kan worden verminderd.

Om dienst te kunnen doen als toetsingskader of als instrument om hotspotgebieden te identificeren is het nodig dat het verspreidingsmodel de werkelijkheid voldoende accuraat beschrijft. Dit betekent dat het model gevalideerd moet zijn aan die werkelijkheid door middel van metingen.

1.2 Eerdere validaties van Stacks

In Nederland wordt Stacks (ontwikkeld bij het voormalige KEMA) gebruikt als atmosferisch verspreidingsmodel voor fijnstof en geur rondom veehouderijen in het kader van vergunningverlening. Daarnaast bestaat er het OPS (Operationeel model Prioritaire Stoffen; ontwikkeld bij het RIVM). Het Aerius model, gestoeld op OPS, wordt gebruikt voor berekening van de depositie van ammoniak uit veehouderijen en stikstofoxiden afkomstig van verkeer en industrieën. Het OPS model wordt door het RIVM ingezet om concentratiekaarten, depositiekaarten en tijdstrends te genereren voor luchtverontreiniging in Nederland; voor een scala aan gasvormige en deeltjesvormige componenten en voor alle sectoren.

In Bijlage A is een overzichtstabel opgenomen van in het verleden uitgevoerde validatiestudies met Stacks en OPS, met een focus op validaties bij agrarische bronnen. Bij de interpretatie van validatiestudies moet onderscheid worden gemaakt in een aantal belangrijke aspecten:

- *schaal* van de validatie: lokale validatie o.b.v. één stalbron versus gebiedsvalidatie o.b.v. vele stalbronnen samen;
- *ruimtelijke variatie*: kan het model concentraties goed voorspellen van plaats tot plaats;
- *temporele variatie*: kan het model concentraties goed voorspellen van moment tot moment;
- ten aanzien van de temporele variatie is het belangrijk op welke *tijdsresolutie* de validatie is uitgevoerd: uur, dag, week, twee-week, maand of jaar;
- de *component* waarvoor de validatie is uitgevoerd: ammoniak, fijnstof, enzovoort. Belangrijk is te realiseren dat gasvormige componenten (bijvoorbeeld ammoniak) zich anders verspreiden dan deeltjesvormige componenten (bijvoorbeeld PM₁₀₀, PM₁₀ en de endotoxinen daarin).

Bijlage A laat zien dat het Stacks model in het verleden is gevalideerd voor de component ammoniak op basis van twee bestaande datasets. De eerste dataset is op lokale schaal en is verkregen met ammoniakmetingen rondom één varkensstal op het Deense eiland Falster bij een tijdsresolutie van weekgemiddelden (Erbrink et al., 2013; Pedersen et al., 2007). De tweede dataset is op gebiedsschaal (rond het dorp Vragender, NL; het zogenaamde "VELD-project") en is verkregen door de ammoniakemissie uit vele tientallen tot honderden stallen en percelen in te schatten en in het model in te voeren waarna modeluitkomsten zijn vergeleken met ammoniakmetingen met een tijdsresolutie van dag- en weekgemiddelden (ASG-KEMA, 2007; Smits et al., 2005; Van Pul et al., 2008). In deze validaties kwamen voorspelde concentraties respectievelijk redelijk en goed overeen met gemeten concentraties.

Daarnaast is Stacks gevalideerd voor de component endotoxine op basis van een bestaande dataset uit de VGO-1 studie (Maassen et al., 2016, zie hoofdstuk 7; De Rooij et al., 2018). Deze validatie op gebiedsschaal is uitgevoerd ten dienste van zowel het onderzoek naar een toetsingskader voor endotoxinen als de RVG-studie en is gerapporteerd in het rapport van de RVG-studie (Heederik et al., 2019; zie pag. 36-42). De dataset betrof herhaalde metingen van PM₁₀ en het endotoxine daarin op 61 meetpalen in het VGO-gebied bij een middelingsduur van twee weken. Vele honderden stallen (en hun locatie, diercategorie, huisvestingssysteem, aantal dieren en emissie) zijn gebruikt als invoer in het model. De voorspelde jaargemiddelde concentraties kwamen goed overeen met gemeten jaargemiddelde concentraties, mits er werd gerekend met warmte-emissie uit de stalgebouwen. Lucht uit stalgebouwen is doorgaans warmer dan de buitenlucht waardoor deze tot hoger in de atmosfeer doorstijgt waarbij deeltjes zich verder verspreiden en concentraties nabij de bron lager zijn. Zonder deze warmte-emissie werd een overschatting verkregen van ongeveer een factor 2,5. Opgemerkt moet worden dat warmte-emissie niet standaard wordt meegenomen in de toetsingskaders voor fijnstof en geur.

Hoewel Stacks wordt ingezet voor verspreidingsberekeningen rond individuele stalgebouwen in vergunningsverlening, is deze nog niet eerder gevalideerd op dit schaalniveau, en ook niet voor fijnstof.

1.3 Doelstelling en hoofdlijnen van dit onderzoek

Dit onderzoek beoogde daarom het Stacks model te valideren voor stofdeeltjes en de endotoxinen daarin o.b.v. emissie- en veldmetingen rond één lokaal veehouderijbedrijf. Deze validatie van Stacks was voorzien als fase 4 van het onderzoek naar een toetsingskader voor endotoxinen. Daarnaast is ammoniak meegenomen in de validatie als belangrijke gasvormige component in verspreidingsberekeningen.

In de validatie van Stacks op gebiedsniveau voor endotoxinen in de PM₁₀ fractie (Heederik et al., 2019) bleek dat toepassing van het model zonder rekening te houden met de warmte-emissie vanuit stallen de veldmetingen met een factor 2,5 worden overschat. Deze bias was er niet als warmte-emissie wél werd verrekend in de verspreidings- en depositieberekeningen. De vraag die daarbij opgeworpen werd is of het echt de warmte-emissie is die verantwoordelijk is voor de overschatting.

Immers, er zijn andere modelaspecten te benoemen waardoor de overschatting verklaard zou kunnen worden: een ander (veel sterker) effect van de stalgeometrie op de verspreiding, een andere impact van de depositie of de aanwezigheid van een bias in de gehanteerde emissies. Het is dus niet alleen belangrijk vast te stellen dat een model de werkelijkheid goed voorspelt, maar ook dat het model de werkelijkheid goed voorspelt om de juiste redenen. Deze aspecten kunnen het beste worden onderzocht bij één lokale stalbron.

In dit validatieproject is daarom gekozen om een serie metingen uit te voeren bij een pluimveebedrijf in een schone omgeving, d.w.z. zonder de aanwezigheid van andere stallen in de nabije omgeving. Wanneer de werkelijke emissies uit de stal accuraat bemeten worden en tegelijkertijd in het veld, op een rij windafwaarts, de immissies worden bemeten, is de juiste werking van het model te evalueren. Een dergelijk bedrijf is gevonden op een locatie in Noord-Nederland nabij de Waddenkust.

1.4 Dit rapport

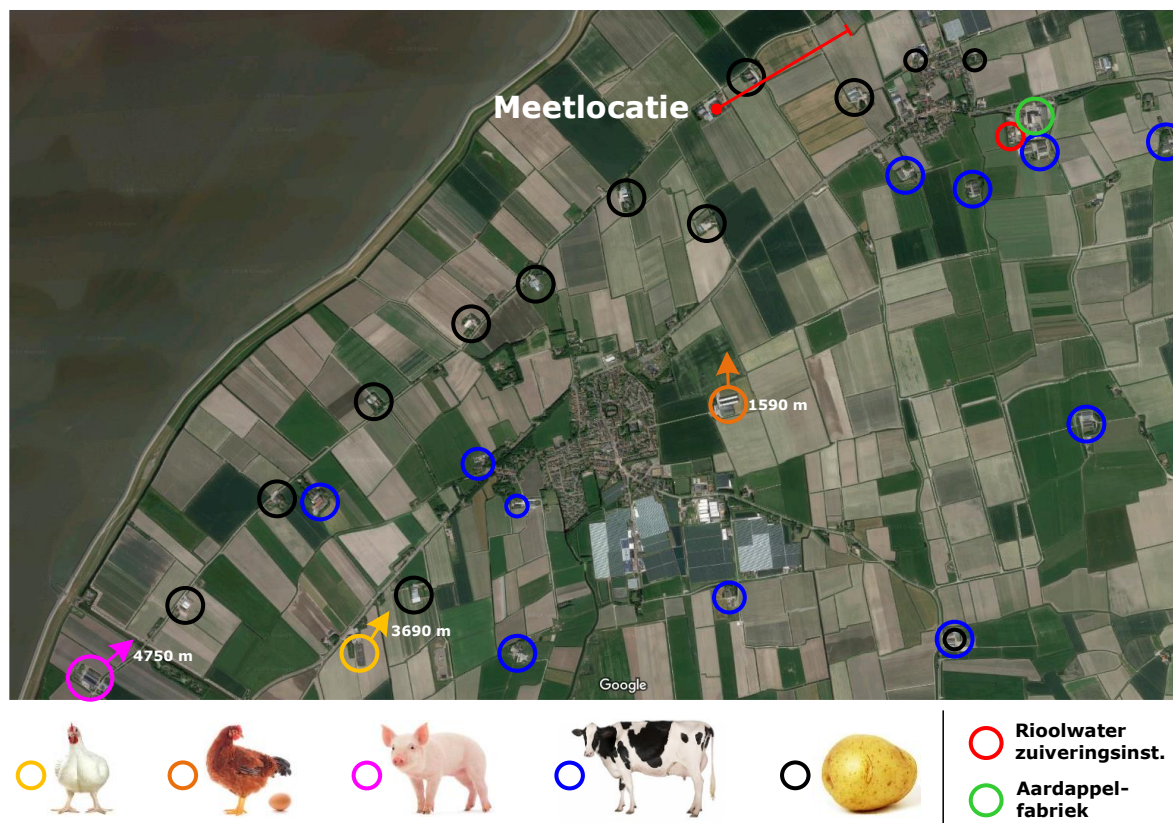
In dit rapport wordt verslag gedaan van de vergelijking tussen veldmetingen en modeluitkomsten. Eerst wordt een beschrijving gegeven van de gevolgde aanpak (hoofdstuk 2), daarna worden de resultaten van de metingen beschreven en de modeluitkomsten met deze metingen vergeleken (hoofdstuk 3). In hoofdstuk 4 worden de resultaten verder bediscussieerd en worden conclusies en aanbevelingen gegeven. Dit rapport bevat tot slot een bronnenlijst en een aantal bijlagen.

2 Methodologie

2.1 Beschrijving vleeskuikenbedrijf en omliggend gebied

Het bedrijf waar de modelvalidatie is uitgevoerd betrof een vleeskuikenbedrijf met twee stallen met in totaal ongeveer 58.000 vleeskuikens. Een uitgebreide bedrijving van de vleeskuikenstallen is weergegeven in Bijlage A.

Het bedrijf bevond zich op een locatie in Noord-Nederland op circa een kilometer ten oosten van de kust: bij westelijke windrichtingen (de boogde windrichting in dit onderzoek) waren er zodoende nauwelijks regionale bronnen van stof en endotoxinen (figuur 2.1). Binnen een straal van een kilometer waren geen andere stallen aanwezig. De dichtstbijzijnde intensieve veehouderijbedrijven betroffen een leghennenbedrijf op 1590 m in ZZO richting, een vleeskuikenbedrijf op 3690 m in ZZW richting en een varkensbedrijf op 4750 m in ZW richting. Naburige agrarische bedrijven betroffen akkerbouwbedrijven.



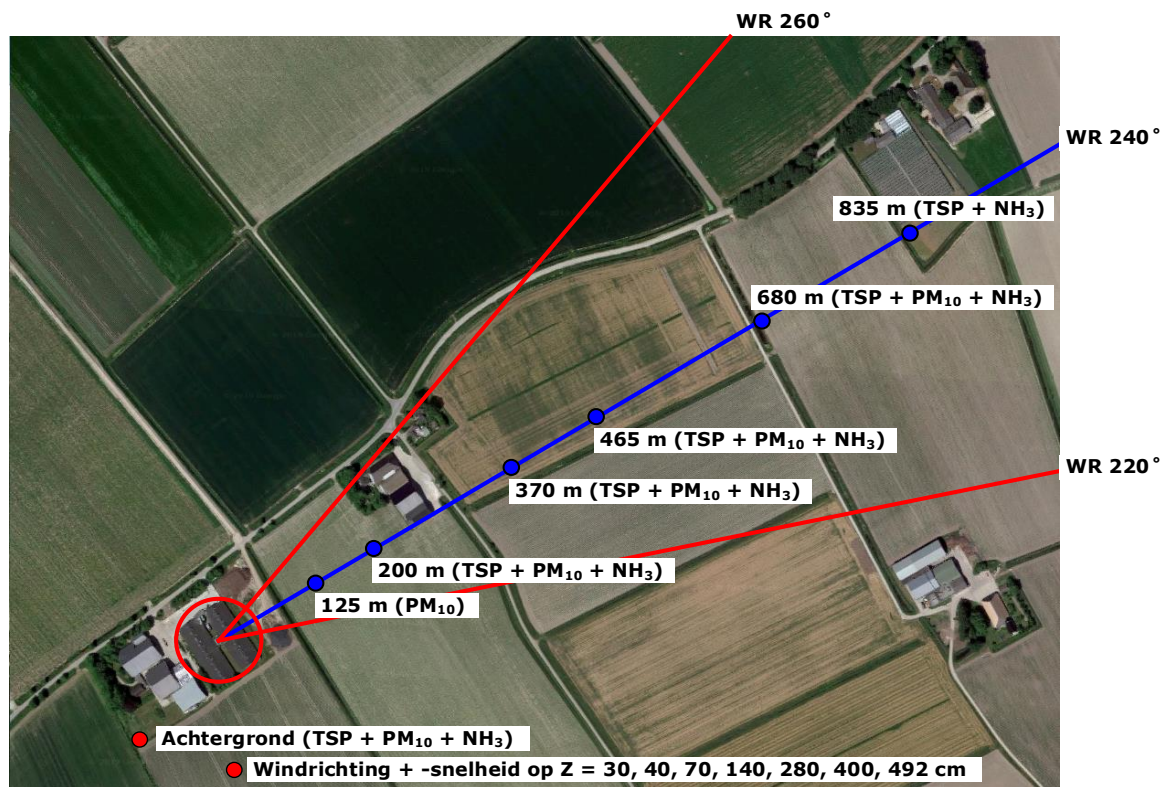
Figuur 2.1 Analyse van de omgeving rond de meetlocatie met aangegeven de afstand tussen omliggende bronnen en de meetlocatie. De rode lijn bovenin de figuur representeert de lijn waarlangs metingen in het veld zijn gedaan om stofdeeltjes, endotoxinen en ammoniak (de emissiepluim) uit de vleeskuikenstallen terug te meten.

2.2 Hoofdlijnen van het onderzoek

Op voornoemde meetlocatie zijn (zoveel mogelijk continue) metingen uitgevoerd tussen 21 februari 2019 13:00 en 13 maart 2019 08:00 (totaal 476 uren).

In de twee vleeskuikenstallen zijn de emissies van stofdeeltjes (inhaleerbaar stof oftewel PM_{100} , PM_{30} en PM_{10}), de endotoxinen in voornoemde fracties en ammoniak gemonitord.

Op circa 100 m ten zuiden van de stallen is een meteomast geplaatst om de lokale meteorologie (windrichting, windsnelheid en temperatuur) vast te leggen. Bovenwinds, op circa 100 m ten zuidwesten van de stallen, zijn de achtergrondconcentraties bepaald van Total Suspended Particles (TSP; en het endotoxine daarin), PM_{10} en ammoniak. Deze componenten zijn ook bepaald op zes posities in een rechte lijn benedenwinds van de stallen. Deze rechte lijn strekte zich uit vanuit de windrichting 240° . Uren met windrichtingen tussen 220° en 260° werden beschouwd als bruikbaar voor de modelvalidatie. Bij deze windrichtingen stroomde de lucht over het achtergrondmeetpunt, over de stalbronnen en langs de rechte lijn met benedenwindse meetstations. Figuur 2.2 geeft een overzicht van alle meetpunten. Voor ammoniak werden extra meetpunten ingericht tussen de hoofdpunten in (niet in de figuur).



Figuur 2.2 De meetpunten buiten de stallen. De rode cirkel representeert de stalbron. De blauwe lijn is de lijn waarlangs de metingen in het veld zijn gedaan. De rode lijnen representeren de grenzen van windrichting (tussen 220° en 260°): alleen uurwaarden met een windrichting binnen deze windsector zijn meegenomen in de modelvalidatie.

De lokale meteorologie en de emissiemetingen in de stallen dienden als modelinvoer. De benedenwinds gemeten concentraties dienden ter validatie van de modeluitkomsten. Door de meetcampagne in de laatste drie weken van de groeicyclus van de dieren uit te voeren, is bereikt dat de emissies maximaal waren.

Om te voorkomen dat meting van de emissiepluim uit de vleeskuikenstallen zou worden vertroebeld door "bijkomende" bronnen van stofdeeltjes, endotoxinen of ammoniak is het bedrijfsterrein onder de loep genomen. Naast de stallen lag een hoop met compost welke met landbouwfolie is afgedekt om

windemissies te voorkomen. Naast de stallen bevond zich verder een put voor spoelwater uit de stallen; het luik naar deze put is afgedekt om gasvormige emissies te voorkomen.

2.3 Metingen

2.3.1 Metingen van concentraties en ventilatiedebiet in de stallen

In beide stallen is één dakkoker gekozen als representatief emissiepunt. Dit betroffen dakkokers met ventilatoren die altijd draaiden (voor de minimumventilatie). Figuur 2.3-A toont een overzicht van de meetapparatuur nabij een ventilatorkoker van stal 1.

Stof en endotoxinen

De concentraties van PM₁₀₀, PM₃₀ en PM₁₀, alsook de endotoxinen daarin, in de uitgaande ventilatielucht van de stallen zijn zesmaal (verspreid over de meetcampagne) gravimetrisch gemeten gedurende 4 uren. De filters werden voor en na de bemonstering gewogen in een weeglab om de ingevangen massa aan stof te bepalen. Tevens werd het gehalte aan endotoxinen in deze stoffracties (endotoxin units (EU)/mg stof) bepaald met de LAL-assay (zie voor details: Winkel et al., 2018). Op dezelfde zes dagen werd tevens het 24-uurspatroon in de PM₁₀-concentratie bepaald met een lichtverstrooiingsmethode (DustTrak, model 8530, TSI Inc., Shoreview USA). In tegenstelling tot de hiervoor genoemde gravimetrische methoden, is de DustTrak in staat om minuutwaarden van de PM₁₀-concentratie te meten. De DustTrak kent echter een systematische fout: het absolute niveau waarop het concentratiepatroon ligt moet met vergelijking aan een gravimetrische methode worden gecorrigeerd naar het werkelijke niveau (Winkel et al., 2015a; Cambra-Lopez et al., 2015). Een vergelijking tussen de PM₁₀-concentratie gemeten met de gravimetrische methode en de PM₁₀-concentratie van de minuutwaarden van de DustTrak op dezelfde plek en over dezelfde 4 uren werd gebruikt om de concentraties van de DustTraks te schalen naar een juist niveau. Voor dagen waarop geen DustTrak data beschikbaar was, werd een 24-uurspatroon in stofconcentratie geïnterpoleerd. Verder werd de deeltjesgrootteverdeling gemeten van deeltjes met diameters tussen 0,25 en 32 µm (Portable Aerosol Spectrometer, model 1.109, GRIMM Aerosol Technique GmbH & Co. KG, Ainring, Duitsland).

Ammoniak en koolstofdioxide

De concentratie van ammoniak (NH₃) in de uitgaande ventilatielucht werd gemeten met sensoren (Dräger, Lübeck, Duitsland, Polytron 8000-series). De concentratie van koolstofdioxide in de uitgaande ventilatielucht werd eveneens gemeten met sensoren (Vaisala, Vantaa, Finland, probe type GMP252). Beide modellen sensoren werden voorafgaand aan het onderzoek in het Air Quality Lab van Wageningen Livestock Research gekalibreerd met ijk-gassen. De data uit beide modellen sensoren werden continu opgeslagen in een dataopslagbox (Campbell Scientific Inc., Logan UT, VS). Tijdens drie van de zes dagen waarbij stoffracties ook gravimetrisch werden bepaald (zie voorgaande alinea) zijn de continue stalmetingen van ammoniak met de Dräger sensoren uitgebreid met simultane en "side-by-side" metingen met de natchemische methode (n=3 dagen x 2 stallen = 6 datapunten). De vergelijking tussen beide meetmethoden is weergegeven in Bijlage C (figuur C13). Eén waarneming uiterst rechts in de figuur wijkt sterk af van de 1:1 relatie (groene stippellijn). Op basis van de uitstekende relatie tussen beide meetmethoden in andere (validatie)studies zijn de concentraties bepaald door de Dräger zonder correcties gebruikt voor berekening van de ammoniakemissies uit de stallen.

Binnenklimaat

De temperatuur (°C) en relatieve luchtvochtigheid (%) van de uitgaande ventilatielucht werden gemeten met combi-sensoren (Askey Dataloggers, Leiderdorp; model Escort iLog). Daarnaast werd de temperatuur gemeten door sensoren van het ventilatiesysteem, zowel in de stallen als in de buitenlucht; deze data werden gedownload vanaf de stalcomputer.

Ventilatiedebiet

Het relatieve niveau van het ventilatiedebiet (% van de ventilatiecapaciteit, op een tijdsresolutie van een uur) werd continu gemeten, gelogd in de stalcomputer van het bedrijf en gedownload voor

verdere berekeningen. Het absolute niveau van het ventilatiedebiet (in m³/uur/dier; als 24-uursgemiddelde) werd bepaald d.m.v. de CO₂-balansmethode. Bij deze methode wordt het ventilatiedebiet berekend door de balansformule op te lossen tussen enerzijds de productie van CO₂ door de vleeskuikens op basis van hun lichaamsgewicht en anderzijds de gemeten CO₂-concentratie (CIGR, 2002; Pedersen et al., 2008). Het ventilatiedebiet uit de CO₂-balansmethode werd gebruikt om patroon in ventilatiedebiet zoals gelogd door de stalcomputer te schalen naar een absoluut accuraat niveau.

2.3.2 Berekening van werkelijke emissies uit de stallen als modelinvoer

Alle data van concentraties en debieten zijn geaggregeerd tot uurwaarden ($n=476$). De emissies zijn (zoals gebruikelijk) berekend door per stal en per uur het ventilatiedebiet (m³/uur) te vermenigvuldigen met de concentratie van de betreffende component (PM₁₀₀, PM₃₀, PM₁₀, het endotoxine in voornoemde fracties en ammoniak) verminderd met de achtergrondconcentratie in het geval van stof (hiervoor is PM₁₀ genomen voor alle fracties) en ammoniak. Voor de achtergrondconcentratie van PM₁₀ zijn de concentraties gedownload van het Landelijke Meetnet Luchtkwaliteit (www.luchtmeetnet.nl/rapportages) voor de meest nabij gelegen meetstations Balk en Kollumerwaard. Voor ammoniak waren dit de meetstations Wieringerwerf en Valthermond.

2.3.3 Metingen lokale meteorologie

Figuur 2.3-B toont de apparatuur voor meting van de lokale meteorologie op circa 100 m ten zuiden van de stallen. Langs deze mast werd op 7 hoogtes ($z = 0,3; 0,4; 0,7; 1,4; 2,8; 4,0$ en $4,9$ m) de windrichting en windsnelheid continu gemeten door windsensors (Gill Instruments Ltd., Lymington, Verenigd Koninkrijk; type: Gill 2-D sonic wind sensor) met een tijdsresolutie van 10 minuten. Doordat een 3D sonic anemometer is ingezet zijn tevens de surface-heatflux en wrijvingsnelheid u^* bemeaten. Deze bleken achteraf veelal onrealistische waarden te bevatten, waardoor deze niet zijn gebruikt in bij de modelberekeningen. De installatie van en metingen met de meteomast werd uitgevoerd door TNO (Petten, NL), in nauw overleg met de auteurs.

2.3.4 Bovenwindse en benedenwindse luchtmetingen in het veld

Figuur 2.3-C toont de apparatuur voor de luchtmetingen in het veld.

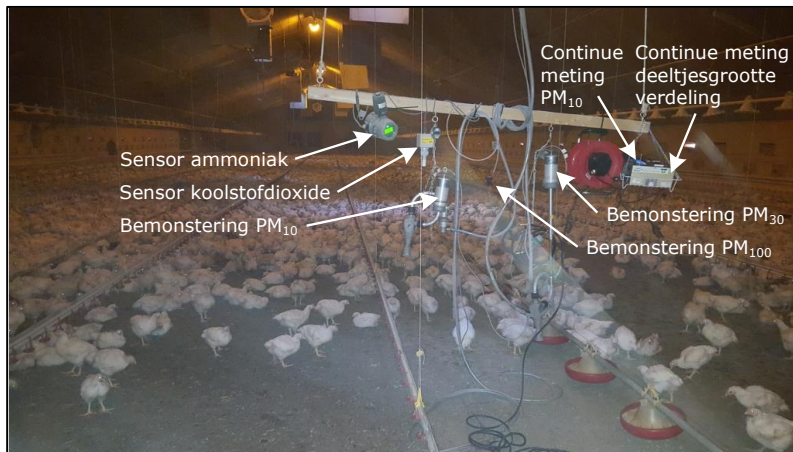
Stoffracties en endotoxinen

In het veld is PM₁₀ continu gemeten met zogenaamde AirBoxen (TNO, Petten, NL). De AirBoxen zijn luchtmeetkasten welke o.a. beschikken over een PM₁₀ sensor. Gekozen is voor deze meetmethode omdat hiervan (i.t.t. de meeste alternatieven) voldoende instrumenten beschikbaar waren en verwacht werd dat deze voldoende accuraat en onderscheidend zouden zijn om concentraties en concentratieverschillen rond het pluimveebedrijf te vast te kunnen stellen. De installatie van en metingen met de AirBoxen werd uitgevoerd door TNO (Petten, NL), in nauw overleg met de auteurs. Voorafgaand aan de meetcampagne werden de AirBoxen een week lang "side-by-side" in Petten ingezet door TNO ter controle op systematische afwijking van één of meerdere AirBoxen. Concentraties van PM₁₀ werden opgeslagen als 10-minuutgemiddelden en via een draadloos verbinding op afstand gedownload. De TSP (Total Suspended Particles) fractie is bemonsterd met automatische filterwisselaars voorzien van een TSP inlaatkop (Comde Derenda, Stahnsdorf, Duitsland) en met een bemonsteringsduur oplopend van 4 uur voor de korte afstanden tot 24 uur voor de grotere afstanden. In het TSP is het gehalte aan endotoxine bepaald middels de LAL assay zoals beschreven in Winkel et al. (2018).

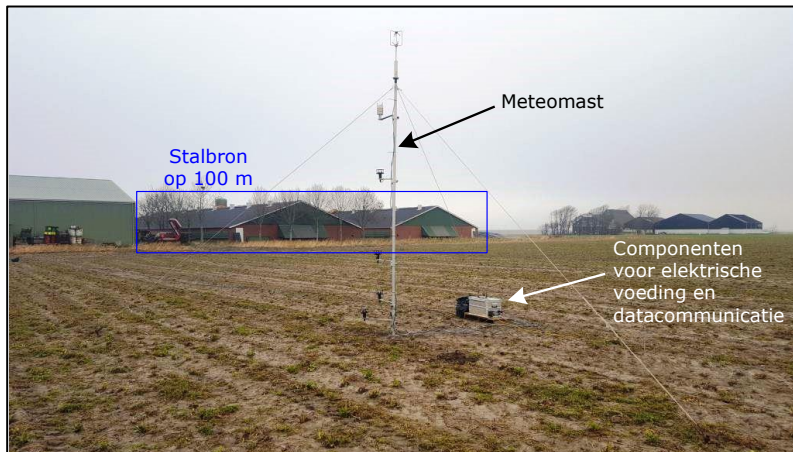
Ammoniak

Ammoniak is gemeten met ammoniak-adsorptiebuisjes (Radiello passive air sampler, Istituti Clinici Scientifici Maugeri, Vicenza, Italië). Deze buisjes adsorberen gasvormig ammoniak uit de lucht als ammonium (NH₄⁺). D.m.v. spectrofotometrische analyse wordt de oorspronkelijke in de lucht aanwezige ammoniakconcentratie bepaald. De bemonsteringsduur bedroeg drie tot vier dagen. Voor ammoniak werden de adsorptiebuisjes opgesteld op de meetpunten zoals weergegeven in figuur 2.2,

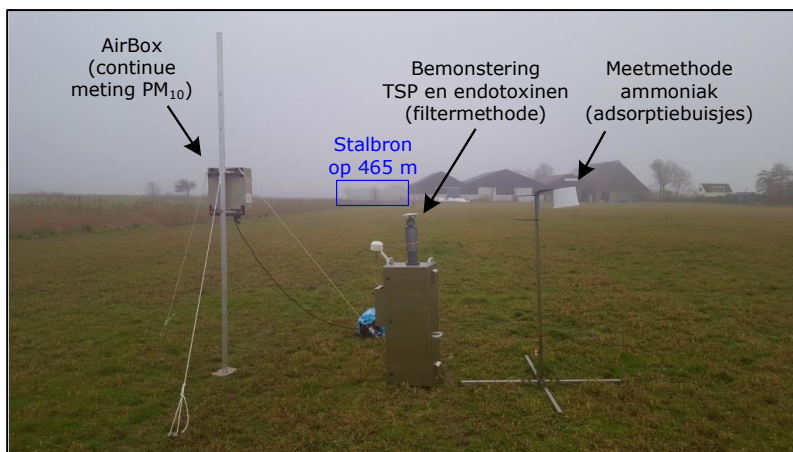
maar ook tussen deze punten in werden extra meetpunten opgesteld voor alleen ammoniak om deze bij een hogere ruimtelijke resolutie te kunnen meten.



Figuur 2.3-A Foto van de meetpositie in stal 1. Aangegeven zijn de verschillende meetmethoden voor de uitgaande ventilatielucht, hangende aan een oplierbare balk.



Figuur 2.3-B Foto van de meteomast op circa 100 m ten zuiden van de vleeskuikenstallen voor het meten van de lokale windrichting, windsnelheid en temperatuur.



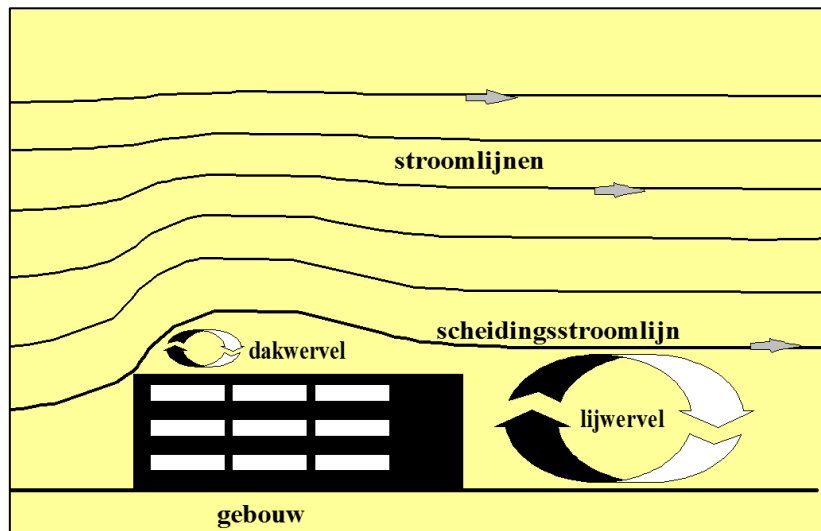
Figuur 2.3-C Foto van het meetpunt op 465 m benedenwinds van de vleeskuikenstallen. Aangegeven zijn de meetmethoden voor PM₁₀, stof (Total Suspended Particles, TSP), endotoxinen en ammoniak. Binnen het blauwe kader zijn de vleeskuikenstallen zichtbaar door de nevel van het moment van fotograferen.

2.4 Invoergegevens en uitgangspunten modellering

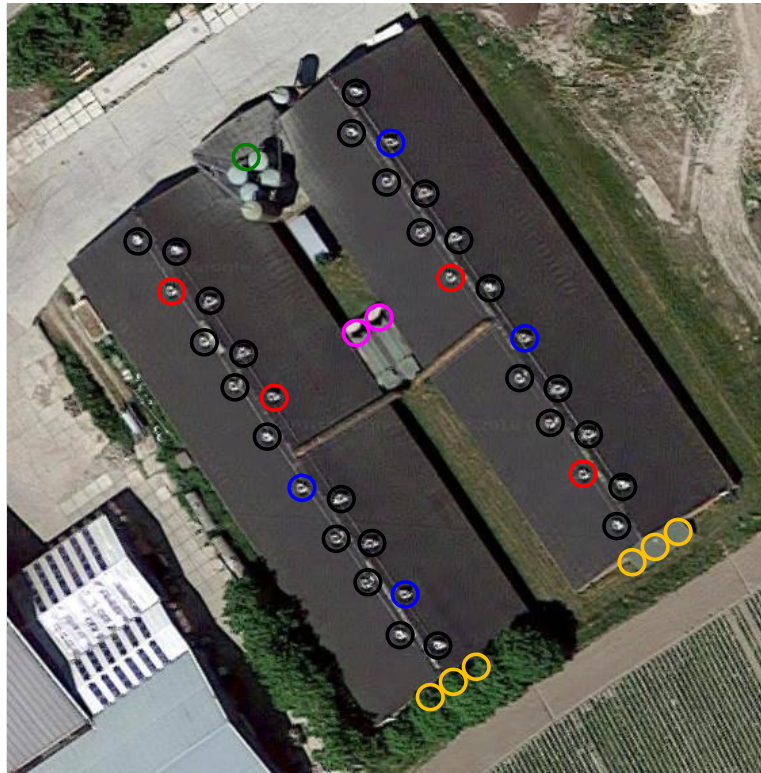
De gemeten PM₁₀ concentraties zijn geanalyseerd om het staleffect te kwantificeren. Dat is gedaan door de windrozen te vergelijken voor de verschillende meetpunten: in de windrichting waarbij de emissiepluim uit de stal over de meetpunten moet zijn gegaan, is het aannemelijk dat de concentraties benedenwinds hoger zullen zijn bovenwinds en wel des te meer, naarmate het meetpunt dichter bij de stal ligt. Daarbij wordt aangenomen dat de diverse AirBoxen op dezelfde manier reageren op verschillen in stofconcentraties.

2.4.1 Gebouwworm, uitstroomsnelheid, emissiepunten en verdiscontering warmtewisselaars

Voor de modelberekeningen is het nodig om de stallen als rechthoekige gebouwen te beschrijven. De gebouwroutine in het Stacks model gaat uit van verstoorde stroomlijnen rond het gebouw waarbij de verstoring alleen geschiedt door het betreffende gebouw zelf. Achter het gebouw wordt een lijwervel beschreven waarbij de emissies vanuit de top van het gebouw al of niet ten dele in deze lijwervel worden opgenomen en daarvanuit als een secundaire bron zich zullen verspreiden (zie figuur 2.4). Doordat twee stallen dicht bij elkaar staan, is een benadering van twee afzonderlijke stallen absoluut onvoldoende. Daarom wordt in dergelijke situaties de omhullende van het gebouw genomen en als vervangend gebouw gedimensioneerd. In dit geval betekent dit dat de stallen een omvang hebben van 80 x 55 m en een hoogte van 6 m. De oriëntatie ten opzichte van de west-oost lijn is 120°. Uit de gegevens van het ventilatiesysteem in de stallen is berekend dat de uitstroomsnelheid uit de emissiepunten ongeveer 8 m/s bedroeg. Hoewel de stallen in beginsel elk 16 emissiepunten hebben, waren de omstandigheden tijdens de metingen zodanig dat de emissies uit veel minder emissiepunten op het dak stroomden. Bij de modelberekeningen is uitgegaan van vier emissiepunten (twee op elke stal, zie figuur 2.5). De twee warmtewisselaars tussen de twee stallen waren zeker ook emissiepunten, maar zijn uit praktische overwegingen niet apart opgenomen. Van de warmtewisselaar is bekend dat deze ook een stofreducerend vermogen heeft. Voor de afvangst van stofdeeltjes in deze deelstroom van de totale ventilatie werd 80% voor PM₁₀ en 100% voor de nog grotere deeltjes (PM₁₀₀₋₁₀) genomen (Ellen et al., 2013).



Figuur 2.4 Stroomlijnen rond een gebouw zoals in Stacks geformuleerd.



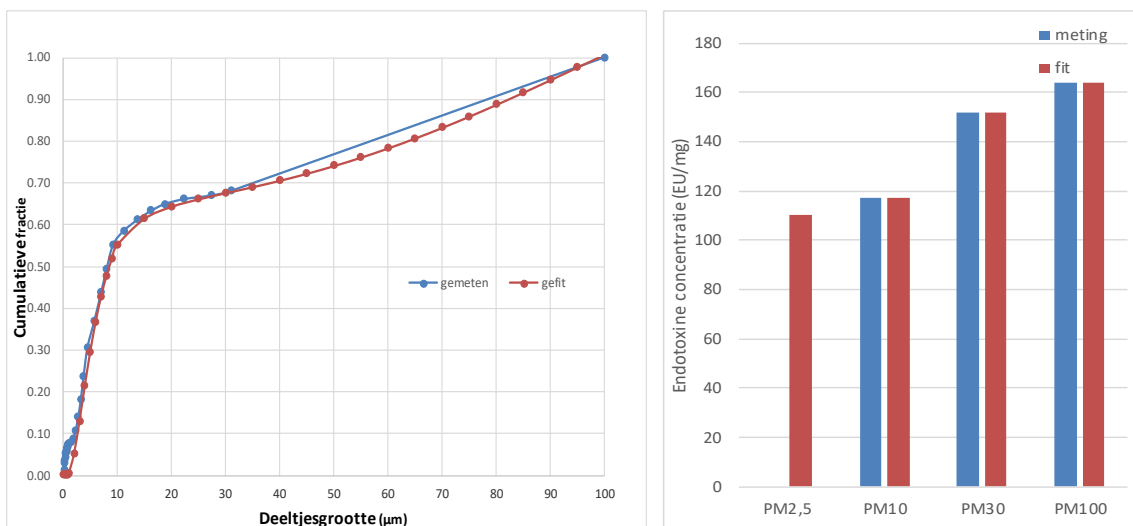
- Schoorsteen warmtewisselaar frequentiegestuurd (stap 1)
- Dakventilator frequentiegestuurd (stap 2a)
- Idem; meetpunt PM_{xx}, NH₃ en CO₂
- Dakventilator aan/uit-gestuurd (stap 2b)
- Eindgevelventilator aan/uit-gestuurd (stap 3)
- Postie luchtpompen, wasflessen, etc.

Figuur 2.5 De emissiepunten (behalve groen) van de stallen op het vleeskuikenbedrijf. De ventilatiebehoefte wordt eerst gerealiseerd met de warmtewisselaars (roze cirkels; stap 1). Als de ventilatiebehoefte de capaciteit van de warmtewisselaars overschrijdt, schakelen de frequentiegestuurde dakventilatoren bij (rode en blauwe cirkels; stap 2a). Bij nog hogere ventilatiebehoefte schakelen aan/uit-gestuurde dakventilatoren bij (zwarte cirkels; stap 2b). Alleen bij een zeer hoge ventilatiebehoefte worden ook de eindgevelventilatoren ingeschakeld (gele cirkels; stap 3); deze waren echter uitgeschakeld gedurende deze studie. In de modellering is uitgegaan van 4 emissiepunten aangewezen, namelijk de **blauwe cirkels** in de figuur.

2.4.2 Deeltjes uit de stallen: deeltjesgrootteverdeling en endotoxinegehalten

Zoals beschreven in paragraaf 2.3.1 is op zes momenten en in beide stallen tegelijkertijd stof bemonsterd (PM₁₀, PM₃₀ en PM₁₀₀) waarin het endotoxinegehalte is bepaald. Aanvullend zijn metingen gedaan om een verfijnde deeltjesgrootteverdeling te bepalen. De deeltjesgrootteverdeling in beide stallen was zeer vergelijkbaar en dat gold ook voor de endotoxinegehalten. Deze metingen zijn gebruikt om voor de modeltoepassing tien deeltjesgrootte klassen af te leiden met elk de gewichtsfractie en een endotoxinegehalte. Dit resulteerde in een verdeling zoals weergegeven in figuur 2.6 en tabel 2.1.

Zoals zichtbaar in tabel 2.2 blijken de in deze studie gemeten gewichtsfracties goed overeen te komen met de metingen gerapporteerd in Winkel et al. (2018), maar het gehalte aan endotoxine is factoren lager. Niet alleen is het een factor 4 lager dan het gemiddelde maar de hier gemeten waarden vallen zelfs geheel buiten de bandbreedte van de metingen in Winkel et al. (2018).



Figuur 2.6 Deeltjesgrootte verdeling (links) en endotoxinegehalte (rechts) in PM_{10} , PM_{30} en PM_{100} zoals gemeten en zoals gefit.

Tabel 2.1 Deeltjesgrootteverdeling in drie fracties, zoals gemeten en zoals gefit aan een bimodale verdeling bestaande uit een normale en een lognormale verdeling.

Fractie	Fit	Metingen
PM_{10}	0.552	0.552
PM_{10-30}	0.124	0.118
PM_{30-100}	0.331	0.330

Tabel 2.2 Kentallen voor de 10 fracties zoals gerapporteerd in Winkel et al. (2018) en gebruikt in de RVG-studie (Heederik et al., 2019) voor vleeskuikens versus zoals in deze studie afgeleid.

Diameter (μm)			Winkel et al. (2018)		Deze studie	
Van	Tot	Gem.	Gewicht %	EU/mg	Gewicht %	EU/mg
1	6	2.5	26.7	274	36.7	112
6	10	8	17.1	678	18.5	119
10	16	13	9.7	1165	6.8	183
16	22	19	5.1	1161	3.0	171
22	28	25	3.2	1969	2.0	204
28	35	31	2.9	2048	2.0	230
35	45	40	3.9	1550	3.2	219
45	58	51	6.0	1290	5.2	201
58	75	66	9.7	884	8.5	175
75	100	87	16.0	363	14.8	141

2.4.3 Depositie van grotere stofdeeltjes

Het Stacks model houdt rekening met depositie van stof. Omdat het bij de stallen ook gaat om grover stof dan PM_{10} wordt tevens rekening gehouden met pluimdaling van deze grovere deeltjes. Deze grotere deeltjes hebben immers een aanzienlijk grotere valsnelheid dan PM_{10} (dat daarom ook wel 'zwevende deeltjes' wordt genoemd). In de rapportage van het onderzoek 'Risicomodellering Veehouderij en Gezondheid' (Heederik et al., 2019) is dit in meer detail beschreven.

2.4.4 Omgevingsruwheid

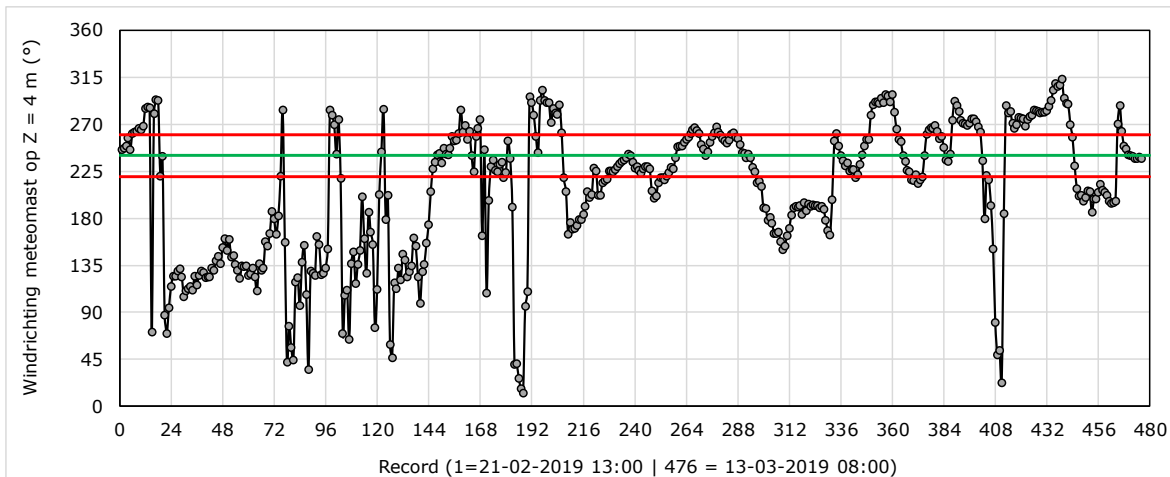
De omgevingsruwheid is gesteld op 8 cm. Dit is de waarde die uit de PreSRM data volgt en is hier voor alle uren aangehouden.

2.4.5 Meteorologie

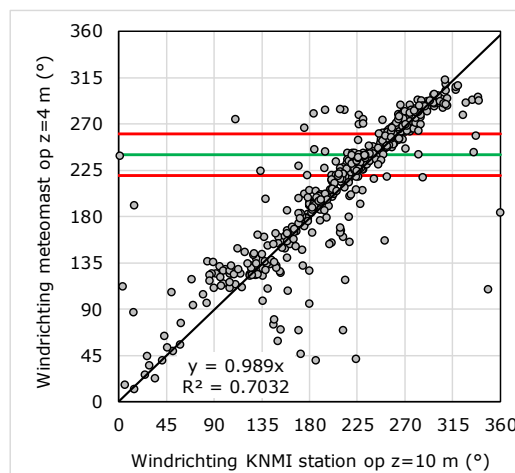
De meteorologie is samengesteld uit de uurlijkse metingen van windrichting en windsnelheid zoals gemeten met de lokaal aanwezige meteomast (zie par. 2.3.3), aangevuld met uurwaarden van bewolking (in achtsten), temperatuur ($^{\circ}\text{C}$), globale straling (J/cm^2) en neerslag (mm) vanuit het

dichtstbijzijnde KNMI meetstation. De windrichtingsmetingen op locatie zijn gevalideerd aan de windmeting op het dichtstbijzijnde KNMI meetstation (op hemelsbreed circa 19 km van de meetlocatie); daarbij is geen systematische afwijking gevonden (zie figuur 2.7-B).

Verder is ervoor gekozen om metingen uit te voeren in een periode waarin het koel, zo niet koud, was. Dat was nodig omdat een vraagstelling bij de validatie de invloed van de warmte-emissie op de verspreiding betreft. Die is het beste te evalueren bij lagere temperaturen. Echter, vorst moest worden vermeden in verband met de werking van samplers en overige werkomstandigheden. Validatie van het model gaat naar verwachting het beste in situaties waarbij de verdunning van de emissies met de afstand niet al te snel gaat, met andere woorden: in een atmosfeer met stabiele of licht stabiele omstandigheden. Die omstandigheden treden veel minder op in het zomerhalfjaar.



Figuur 2.7-A Opgetreden windrichtingen (Y-as) tijdens de meetcampagne van 476 uur (x-as). De bolletjes tussen de rode lijnen representeren uurwaarden met windrichtingen tussen 220 en 260 graden die relevant zijn voor deze studie.



Figuur 2.7-B Opgetreden windrichtingen tijdens de meetcampagne van 476 uur zoals lokaal gemeten met de meteomast (Y-as) tegen de windrichting van het dichtstbijzijnde KNMI station (x-as). De bolletjes tussen de rode lijnen representeren uurwaarden met windrichtingen tussen 220 en 260° die relevant zijn voor deze studie.

2.5 Vergelijking van modeluitkomsten met veldmetingen

In de inleiding van dit rapport (par. 1.2) is een aantal belangrijke aspecten beschreven op basis waarvan modelvalidaties kunnen worden onderscheiden: de schaal van de validatie (stalbron- versus gebiedsvalidatie), het type variatie dat wordt onderzocht (ruimtelijke variatie, temporele variatie en de tijdsresolutie daarbij), en de luchtvervuilingscomponent waarop de validatie wordt uitgevoerd.

Ten aanzien van de vergelijking tussen de modeluitkomsten en de veldmetingen kunnen verder nog de volgende niveaus/aanpakken worden onderscheiden:

1. Plots: model versus meting, gepaard. Van de uren waarbij de wind zodanig staat dat de meetpunten worden belast, worden zowel de gemeten uurgemiddelde concentraties (x-as) als de gemodelleerde concentraties (Y-as) in een figuur geplot, waarbij de datapunten gepaard in tijd en ruimte worden weergegeven. Meestal geven deze plots (te) veel scatter te zien, zodat de volgende methoden nodig zijn, om de stalbijdragen zichtbaar te krijgen.
2. Windrozen van gemeten concentraties. Alle gemeten concentraties worden geplot (Y-as) als functie van de windrichting (x-as, in graden); maar pas nadat de waarden zijn gesorteerd tegen de windrichting en daarna (zowel de windrichtings- als concentratiewaarden) glijdend zijn gemiddeld over een windsector van 5 a 10 graden. Deze representatie wordt een "windroos" genoemd. Door dit voor alle belaste benedenwindse meetpunten te doen wordt de bronbijdrage zichtbaar als een min of meer duidelijke piek. Door ook het achtergrondmeetpunt zo als windroos te plotten wordt de bronbijdrage nog duidelijker.
3. Stalbijdragen, gemiddeld per meetpunt. Van de uren waarbij de wind zodanig staat dat de meetpunten worden belast, worden de gemeten en berekende concentraties gemiddeld. De achtergrondconcentratie wordt over dezelfde uren bepaald door de waarden van het bovenwindse meetpunt te middelen. Deze gemiddelde berekende en gemeten concentraties (y-as, na correctie voor de achtergrond) worden geplot als functie van de afstand tussen stal en benedenwinds meetpunt (x-as).
4. Q-Q-Plots: model versus meting. Van de uren waarbij de wind zodanig staat dat de meetpunten worden belast, worden zowel de gemeten concentraties (x-as) als de gemodelleerde concentraties (y-as) in een figuur geplot, echter pas nadat de datapunten van model en meting onafhankelijk van elkaar zijn gesorteerd. In de figuur wordt zo de laagst gemodelleerde waarde weergegeven bij de laagst gemeten waarde, de één na laagst gemodelleerde waarde bij de een na laagst gemeten waarde, enzovoort. Op deze manier worden "verdelingen met verdelingen" vergeleken. In de statistiek wordt deze analyse en representatie een Q-Q-plot (kwantiel-kwantiel) genoemd.

Voor deze aanpakken is het nodig dat de metingen een hoge tijdsresolutie hebben (bijvoorbeeld uurwaarden), omdat de windrichting van uur tot uur kan verschillen. De windrichting is in dit onderzoek gemeten als 10-minuutwaarden. Hetzelfde geldt voor de metingen van de PM₁₀ concentratie. Voor endotoxinen is het nodig om langere tijd stof op een filter te verzamelen; concentraties met hoge tijdsresolutie zijn voor endotoxine zodoende niet mogelijk. Ammoniak is in dit onderzoek indicatief meegenomen en daarom gemeten met adsorptiebuisjes bij grovere tijdsresolutie. Voor aanpak 3 is het tevens nodig dat meetpunten voldoende in de ruimte verspreid zijn opgesteld zodat zowel hoog belaste (dichtbij) als laag belaste (veraf) plekken worden meegenomen.

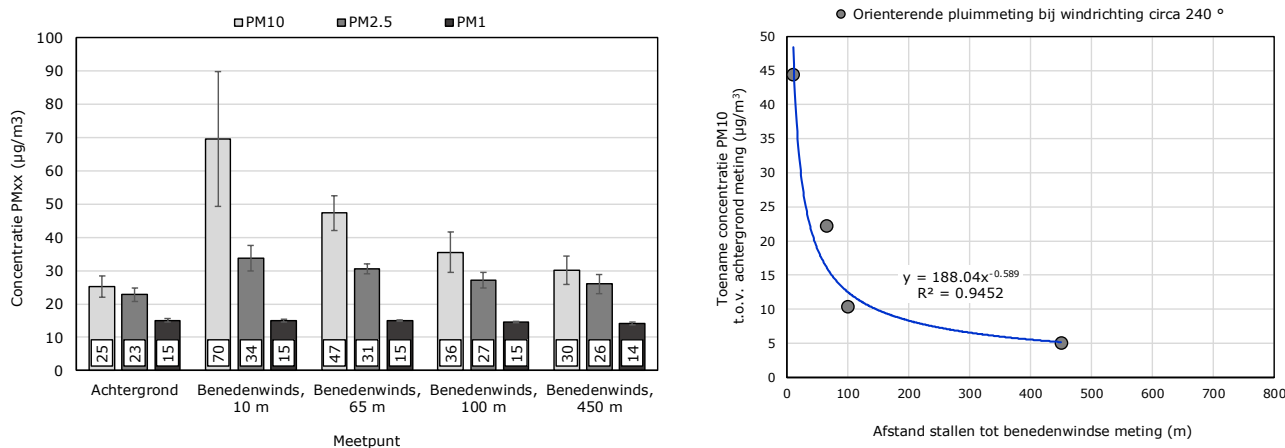
3 Resultaten

3.1 Pilotmeting aan de deeltjespluim uit de stallen

Om te bepalen of de emissiepluim uit de stallen op de beoogde meetpunten (op 125, 200, 370, 465, 680 en 835 m van de stallen) inderdaad detecteerbaar was, is de dag voor installatie van de apparatuur een pilotmeting uitgevoerd. Deze meting was bedoeld om meer zekerheid te krijgen over de afstanden tot waar deeltjes zeker gemeten moeten kunnen worden en tot waar de meetapparatuur in het benedenwindse veld geplaatst kon worden.

Op deze dag bedroeg de buitentemperatuur op de meetlocatie 7–8 °C. De windrichting was ZW, 17–25 km/uur. Met de pilotmeting is pas gestart nadat het licht in de stal was aangegaan (15:00 uur). Op dat moment nemen het ventilatiedebiet en stofconcentratie sterk toe waarmee de emissiepluim vermoedelijk beter meetbaar zou worden. De leeftijd van de kuikens in de stallen was 30 dagen. Het ventilatiedebiet bedroeg volgens de stalcomputer 1,5–1,7 m³/uur per dier. Uit de data van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit (meetstations Balk en Kollumerwaard) bleek dat de PM₁₀ concentratie in de buitenlucht op dat moment laag was (rond 10 µg/m³).

De metingen zijn uitgevoerd met een optische meettechniek welke de concentratie en de grootte van deeltjes meet (Portable Aerosol Spectrometer, model 1.109, GRIMM Aerosol Technique GmbH & Co. KG, Ainring, Duitsland). Er is eerst een bovenwindse meting gedaan ten zuidwesten van het bedrijf op circa 250 m afstand, gedurende 10 minuten. Vervolgens op 5–10, 65, 100 en 450 m benedenwinds van de stallen. Op de benedenwindse meetpunten werd geprobeerd de emissiepluim in te vangen door de meetapparatuur te bewegen langs een lijn haaks op de windrichting. Op de display van het instrument bleek zeer goed zichtbaar wanneer de emissiepluim werd ingelopen (stijgende deeltjesconcentraties) en wanneer de emissiepluim weer werd uitgelopen (dalende deeltjesconcentraties). Figuur 3.1 toont de resultaten van de metingen.



Figuur 3.1 Links: absolute concentraties van PM₁₀, PM_{2,5} en PM₁ gemeten in de buitenlucht met de Grimm (error bars zijn standaardafwijkingen, n=10 per locatie). Rechts: toename van de PM₁₀ concentratie t.o.v. de achtergrondconcentratie als functie van de afstand van de stallen tot het meetpunt. Merk op dat in de rechter figuur dezelfde data is weergegeven als links maar nu met een x-as op numerieke afstandsschaal.

Uit figuur 3.1 blijkt dat het PM₁₀ in de achtergrond voor 92% uit PM_{2,5} bestond en voor 60% uit PM₁. De concentratie van PM₁ benedenwinds van de stallen werd niet of nauwelijks beïnvloed door de stalbron. Bij PM_{2,5} is de invloed van de stalbron duidelijker, bij PM₁₀ zeer duidelijk. Dit is in overeenstemming met feit dat pluimveestallen binnen de PM₁₀ fractie, op massabasis, met name grote(re) deeltjes tussen circa 4 en 10 µm uitstoten (Lai et al., 2014; Winkel et al, 2015b). De concentratie van PM₁₀ neemt steiler af met afstand vanaf de stal dan de concentratie van PM_{2,5}. Uit

deze pilotmeting bleek dat de emissiepluim meetbaar was tot in ieder geval 450 meter benedenwinds van de stal. Verwacht werd dat de pluim bij hogere buitentemperaturen en bij oudere dieren (hoger ventilatiedebiet en hogere emissies van deeltjes) nog beter en wellicht verder te detecteren zou zijn. Op grond van de pilotmeting werd een definitieve keuze gemaakt voor de meetpunten.

3.2 Emissies van stof, endotoxinen en ammoniak

De resultaten van de stalmetingen (temperatuur, ventilatiedebiet, PM₁₀₀, PM₃₀, PM₁₀, het endotoxine in voornoemde fracties, deeltjesgrootteverdeling en ammoniak) zijn weergegeven in bijlage C.

De twee vleeskuikenstallen lieten voor de meeste gemeten variabelen zeer gangbare niveaus en (tijds)patronen zien. Ook waren de vleeskuikenstallen voor de gemeten variabelen zeer gelijkwaardig. De emissie van PM₁₀ bedroeg gemiddeld over de meetcampagne 39 g/dierplaats per jaar (emissiefactor: 22 g/dierplaats per jaar). De emissie van ammoniak bedroeg gemiddeld over de meetcampagne 0,075 kg/dierplaats per jaar (emissiefactor: 0,021 kg/dierplaats per jaar). Bedacht moet worden dat de emissies van stof en ammoniak tijdens de meetcampagne boven de emissiefactoren lagen doordat alleen is gemeten tijdens de laatste drie weken van de groeironde wanneer emissies pieken terwijl emissiefactoren jaar- en rondagemiddelde waarden representeren. Het streven om bij relatief hoge emissieniveaus voor stof en ammoniak te meten is daarmee bereikt. Op bedrijfsniveau (58.000 dieren in twee stallen totaal) bedroegen de emissies gemiddeld: 314 gram PM₁₀ per uur, 381 gram PM₃₀ per uur, 572 gram PM₁₀₀ per uur en 599 gram ammoniak per uur.

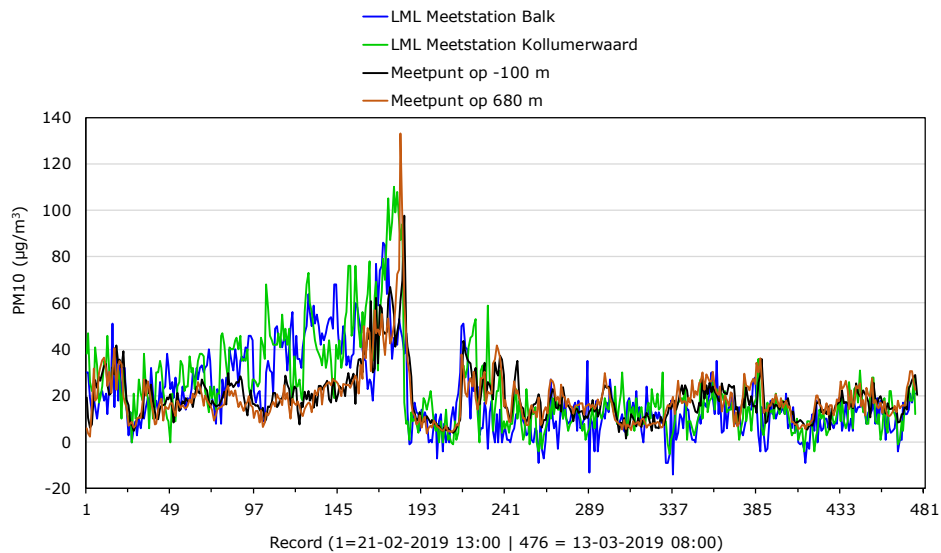
De endotoxinegehalten in de stoffracties bleken niet statistisch significant verschillend tussen stal 1 en stal 2 (op basis van 95%-betrouwbaarheidsintervallen, Student *t*-verdeling) en weinig te variëren tijdens de meetcampagne zodat bij de berekening van de emissies van endotoxine met dezelfde endotoxinegehaltenes voor beide stallen is gerekend. De overall gemiddelde endotoxinegehalten bedroegen 164 Endotoxin Units (EU)/mg in PM₁₀₀, 152 EU/mg in PM₃₀ en 117 EU/mg in PM₁₀. Deze waarden zijn opvallend laag. In recent onderzoek in Nederlandse vleeskuikenstallen (Winkel et al., 2018) bedroegen de endotoxinegehalten gemiddeld (range): 673 (267-1611) EU/mg in PM₁₀₀, 671 (277-1282) EU/mg in PM₃₀ en 429 (180-1072) EU/mg in PM₁₀. Het gehalte endotoxine in het stof van het vleeskuikenbedrijf in dit onderzoek was dus maar liefst een factor 4 lager dan in eerder onderzoek.

3.3 Meteorologie

Het streven in deze studie was om minstens 100 uur bruikbare meetgegevens te verzamelen. Dat wil zeggen: uren met windrichtingen tussen 220 en 260° waarbij de meetpunten in het benedenwindse veld werden aangestreeken. Dit aspect was een risico omdat er omwille van de emissies gemeten diende te worden in de laatste drie weken van de groeicyclus van de vleeskuikens. Het streven is niettemin gehaald: tijdens 133 van de 476 uren (28%) was de windrichting tussen 220 en 260°. De opgetreden weersomstandigheden waren echter niet ideaal voor modelvalidatie; de windsnelheden in een flink deel van de 'bruikbare uren' waren vrij hoog: gemiddeld 8,2 m/s (windkracht 5 op de schaal van Beaufort) met de hoogste uurwaarde 14,4 m/s (7 Bft). Tijdens 87 van de 133 bruikbare uren viel er geen neerslag. Tijdens de overige 46 uren viel er in totaal 31 mm neerslag, met neerslagintensiteiten van gemiddeld 0,8 mm/uur tot maximaal 4 mm/uur.

3.4 PM₁₀: stalinvloed en vergelijking met modelberekening

De continue PM₁₀ metingen zoals die uitgevoerd zijn met de AirBoxen zijn gesorteerd en vervolgens eerst als tijdreeks geplot (figuur 3.2-A; twee van de zes AirBoxen) waarbij tevens de PM₁₀ concentraties zijn mee geplot van twee dichtstbijzijnde meetstations van het LML.

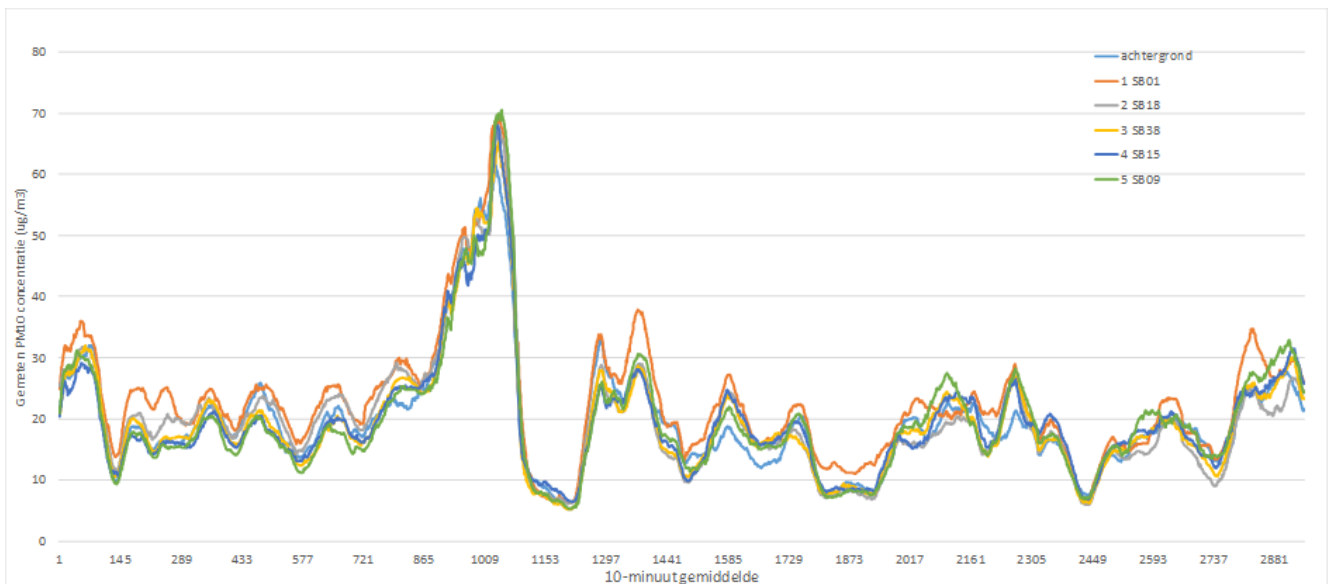


Figuur 3.2-A Tijdsreeks van opgetreden concentraties van PM₁₀ in de buitenlucht (Y-as) tijdens de meetcampagne van 476 uur (x-as). De blauwe en groene lijnen representeren de concentraties van de twee dichtstbijzijnde LML meetstations Balk en Kollumerwaard (Bron: www.luchtmeetnet.nl/rapportages). De zwarte lijn representeert de concentratie op het achtergrond meetpunt op 100 m ten zuidwesten van de stallen. De bruine lijn representeert de concentratie op het meetpunt 680 m ten noordoosten van de stallen. Ten behoeve van de figuur zijn de AirBox-metingen bij de stallen (tijdsresolutie: 10 min) geaggregeerd tot uurwaarden om deze in overeenstemming te brengen met de tijdsresolutie van de LML data. De lijnen betreffen uurwaarden zonder glijdende middeling of andere databewerking.

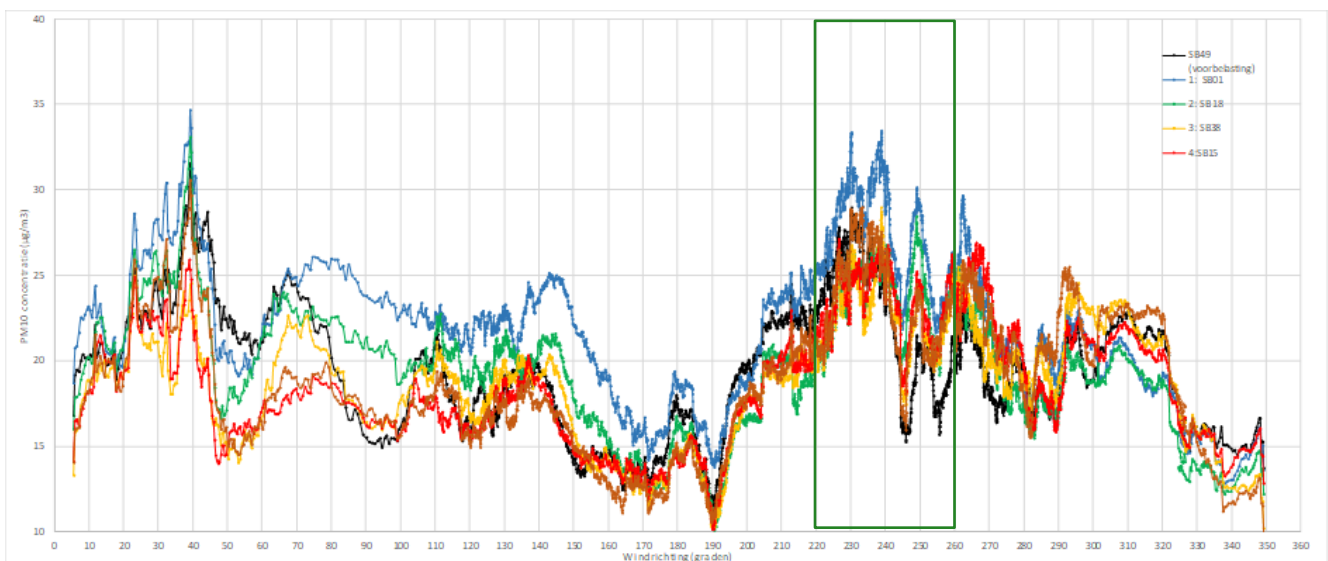
Uit figuur 3.2-A blijkt dat zowel het niveau als de trend in concentraties van de AirBoxen goed overeen kwamen met de trend van de twee meest nabije LML meetstations. Tussen uurwaarde 145 en 193 is een hoge fijnstofconcentratie zichtbaar, met niveaus tot boven 100 µg/m³. Concentraties waren hoog op zowel de meetlocatie als op de twee LML meetstations; dit betrof een periode van hoge fijnstofconcentraties over Nederland op 28 februari 2019 welke in de eerste uren van 1 maart 2019 weer scherp daalden. Het feit dat niveaus en trends in de PM₁₀ concentraties van de AirBoxen goed overeen komen met die van het LML laat zien dat de PM₁₀ concentraties op zijn minst niet erg beïnvloed werden door de stallen.

In figuur 3.2-B is nogmaals de tijdreeks geplot, maar dan van alle zes AirBoxen (10-minuutgemiddelden; glijdend gemiddeld) zonder de twee LML meetstations. De figuur laat sterk wisselende PM₁₀ concentraties zien met de hiervoor beschreven piek op 28 februari. Opvallend is dat dit op alle meetpunten tegelijk gebeurt: op alle zes meetpunten is het verloop van de PM₁₀ concentratie vrijwel identiek. Het meetpunt 1/SB01 op 125 m benedenwinds van de stallen (de oranje lijn in figuur 3.2-B) lijkt daarbij nog wel boven die van de andere lijnen uit te stijgen.

In plaats van als tijdsreeks, zijn in figuur 3.3 de PM₁₀-concentraties geplot naar windrichting in graden. Deze laatste wijze van presenteren geeft de windrozen die direct een sterke aanwijzing kunnen geven over de stalbijdrage aan de M₁₀ concentraties benedenwinds van de stallen. Wanneer we figuur 3.3 en 3.2-B vergelijken, dan zien we dat de concentratie op het 125-m punt (blauwe lijn in figuur 3.3) ook vaak boven de achtergrond uitstijgen bij windrichtingen waarbij stalinvloed niet aan de orde kan zijn.



Figuur 3.2-B Nogmaals de tijdserie van opgetreden concentraties van PM_{10} in de buitenlucht (Y-as) tijdens de meetcampagne, maar nu met 10-minuutgemiddelden van alleen de AirBoxen (zonder LML-stations) op de zes meetpunten in toenemende afstand van de stallen. De lijnen betreffen glijdende gemiddelden over 55 datapunten van 10 minuten (totaal circa 9 uren). Meetpunt 1/SB01 (oranje lijn): 125 m; meetpunt 2/SB18 (grijze lijn): 200 m; meetpunt 3/SB038 (gele lijn): 370 m; meetpunt 4/SB15 (blauwe lijn): 465 m; meetpunt 5/SB09 (groene lijn): 680 m. Op het punt 835 m stond geen Airbox opgesteld. Zie figuur 2.1 voor een overzichtsfoto van de meetpunten.

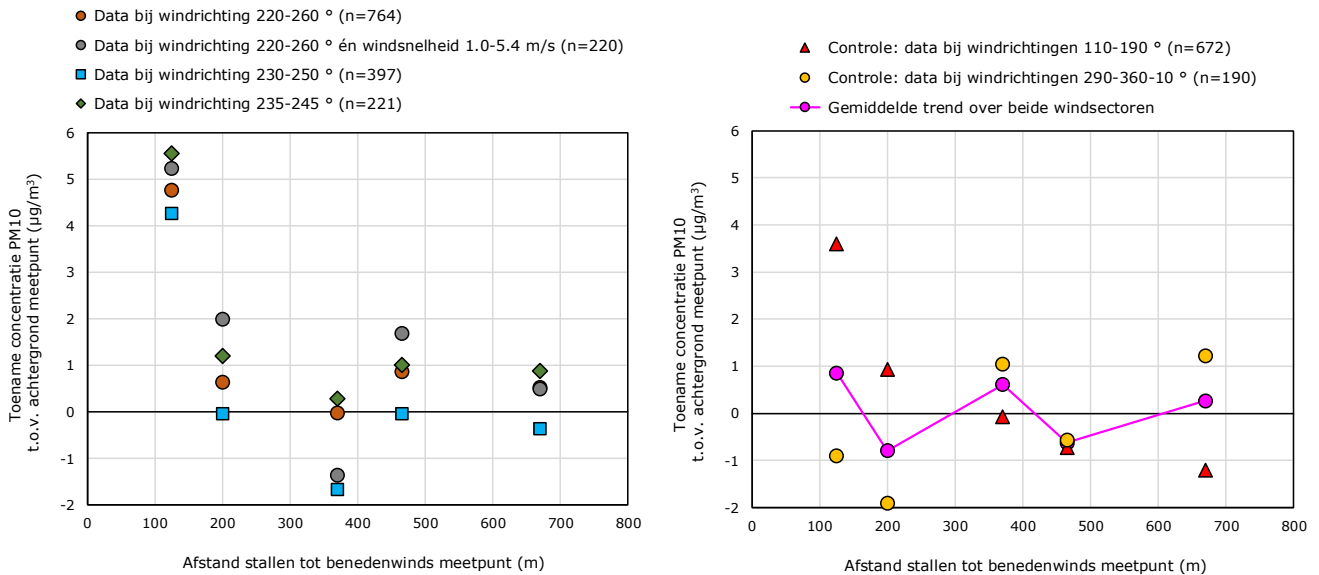


Figuur 3.3 Windroos van gemeten PM_{10} concentraties op alle zes meetpunten. Het groene kader geeft de windrichtingen aan tussen 220 en 260° waarbij de wind over de stallen heen de meetpunten in het benedenwindse veld aanstreekt. De lijnen betreffen glijdende gemiddelden over zes graden ($\pm 3^\circ$) in de windroos.

Figuur 3.3 laat zien dat de PM_{10} concentraties op alle meetpunten sterk samenlopen; in de windrichting waarbij stalinvloed aanwezig is, lijkt de achtergrond inderdaad de laagste waarde te tonen en het punt dat het meest dichtbij de stal ligt, de hoogste waarden. De stalbijdrage bij windrichtingen tussen 220 en 260° is hierna verder geanalyseerd.

Dit is gedaan door de concentraties te middelen over de windrichting 220 tot 260° en deze waarden met aftrek van de achtergrondwaarde te plotten. Dit is gedaan in figuur 3.4. In de linker figuur zijn tevens de gemiddelde concentraties getoond wanneer scherpere selecties worden gemaakt wat betreft

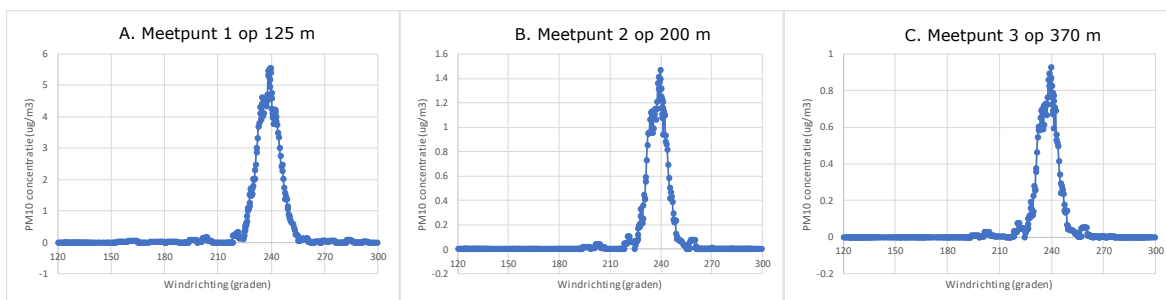
windsector, namelijk: 230-350° en het nog scherpere 235-245° om te bezien of deze scherpere selecties een ander beeld zouden geven. Tevens worden de gemiddelde concentraties getoond op basis van alle data met zowel een windrichting in de basis-windsector 220-260° als een windsnelheid tussen 1 en 5,4 m/s (equivalent aan windkracht 1, 2 en 3 Beaufort), waarbij dus de meetwaarden bij afwezigheid van wind en hoge windsnelheden zijn geëxcludeerd. Ter controle is in de rechter figuur dezelfde exercitie verricht maar dan voor twee windsectoren haaks op de lijn met meetpunten waarbij geen van de meetpunten door een lokale bron binnen een kilometer kan zijn aangestreeken (zie figuur 2.1).



Figuur 3.4 Gemiddelde toename van de PM_{10} concentratie (ten opzichte van het achtergrond meetpunt) als functie van de afstand tot het midden van de stallen voor: drie windsectoren (220-260°, 230-250° en 235-245°) waarbij de wind het benedenwindse meetpunt aanstreekt, daarna de stallen en vervolgens de benedenwindse meetpunten (links; inclusief de windsector 220-260° én een windsnelheid tussen 1 en 5,4 m/s); alsook voor twee controle windsectoren waarbij geen van de meetpunten door een lokale bron binnen een kilometer kan zijn aangestreekt (rechts).

Op het geaggregeerde niveau van figuur 3.4 lijkt er op het eerste gezicht een afnemend patroon in de toename van de PM_{10} concentratie benedenwinds van de stallen te zijn. Een punt van kritiek daarbij is wel dat de verschillen in concentraties voor de niet-beïnvloedende windrichtingen (zie figuur 3.4 rechts) in dezelfde range liggen terwijl men zou verwachten dat de meetpunten dan geen of zeer kleine verschillen zouden aangeven. Dat is niet zo en dat maakt het lastig om het verloop van deze meetwaarden tegen de afstand in figuur 3.4 links als valide en betekenisvol aan te merken.

Met Stacks zijn de uurwaarden berekend voor de eerste drie meetpunten op 125, 200 en 370 m benedenwinds van de stallen. Deze modelvoorspellingen zijn ook als windrozen geplott (concentraties in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tegen de windrichting, glijdend gemiddeld om scatter te onderdrukken), en worden weergegeven in figuur 3.5.



Figuur 3.5 Berekende toename van de PM_{10} concentratie (stalbijdrage = immissie) met het Stacks model, gesorteerd naar windrichting, voor de eerste drie benedenwindse meetpunten, over de hele meetperiode (476 uur).

Uit figuur 3.5 blijkt dat het Stacks model voor het dichtstbijzijnde meetpunt op 125 m berekent dat de gemiddelde concentratie toeneemt met waarden tot maximaal circa $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Op 200 en 370 m is dat nog respectievelijk circa 1,5 en $0,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tijdens de gehele meetperiode van 476 uren bedroeg de achtergrondconcentratie van PM_{10} gemiddeld 21 (range: -14–110) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (uurwaarden van de twee dichtstbijzijnde meetstations van het LML voor dezelfde periode). Dit betekent dat het model berekent dat de twee vleeskuikenstallen op de gekozen meetpunten (125-835 m) een beperkte bijdrage zouden moeten leveren aan de PM_{10} concentratie.

Uit de pilotmeting (zie par. 3.1), het Stacks model, en uit de metingen met de AirBoxen komt het beeld naar voren dat de twee vleeskuikenstallen een beperkte bijdrage hebben geleverd aan de lokale PM_{10} -concentratie van maximaal zo'n $5 \text{ á } 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ voor het dichtstbijzijnde meetpunt op 125 m. Dit beeld kan vergeleken worden met het beeld uit eerdere meetcampagnes buiten stallen zoals die zijn samengevat in tabel 3.1, afkomstig uit de literatuurstudie door Winkel et al. (2014). De studies in tabel 3.1 tonen dat stofconcentraties (sterk) verhoogd zijn in de eerste meters en tientallen meters benedenwinds van de stalbron, scherp dalen en op afstanden rond 100-150 m gemiddeld nog in de orde van grote van microgrammen boven de achtergrond liggen. Hierbij is wel variatie te zien tussen studies, bijvoorbeeld door verschillen in de bronsterkte/omvang van de stalbron.

Ten aanzien van de vergelijking tussen de stalbijdragen zoals gemeten met de AirBoxen en berekend met het Stacks model zijn er twee mogelijke verklaringen: 1) het model voorspelt kleine stalbijdragen en de Airboxen hebben dit ook gemeten met dien verstande dat zij onvoldoende gevoelig zijn om verschillen tussen meetpunten kleiner dan $5 \text{ á } 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ te onderscheiden, of 2) de Airboxen hebben accuraat en voldoende onderscheidend gemeten maar de modelvoorspelling berekent (op dit relatief lage immissieniveau en op de afstanden tussen 125 en 835 m) te hoge stalbijdragen. Uit figuur 3.3 blijkt dat de Airboxen, ook wanneer zij niet onder invloed staan van de emissies van de vleeskuikenstallen, een onderlinge (toeval)spreiding vertonen in een range van 5 tot $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dit maakt de notie in de eerste verklaring, dat de Airboxen onvoldoende gevoelig zijn om verschillen tussen meetpunten kleiner dan $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ te onderscheiden, waarschijnlijk. Uit de vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde PM_{10} concentraties kan dan ook hoogstens worden geconcludeerd dat de modelresultaten voor PM_{10} niet in tegenspraak lijken te zijn met de metingen die een lage stalbijdrage suggereren.

Tabel 3.1 Overzicht van studies naar stofconcentraties in de buitenlucht bovenwinds en benedenwinds van veehouderijen. Benedenwindse concentraties hoger dan de bovenwindse concentratie zijn vetgedrukt. Tabel overgenomen uit Winkel et al. (2014); zie voornoemde publicatie voor referenties.

Eerste auteur (jaar)	Land	Omschrijving bedrijf	Meetperiode	Tijdsduur bemonst.	Stoffractie	Gem. concentratie Bovenwinds [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Gem. concentraties Stal/benedenwinds [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Pluimvee							
Schmidt (1996)	D	Twee leghennenbedrijven en twee vleeskuiken-bedrijven	Jaarrond	30 min	Totaalstof	n.g.	In de stal: ca. 80–2750 Op 3 m: ca. 30–1200 Op 10 m: <400 Op 50 en 100 m: <4
Seedorf (1998c)	D	Vleeseendenstal, nokvent., 2146 dieren	Eenmalige meting	18,5 uur	Totaalstof	114	In de stal: 1900 Op 25 m: 123
Visser (2006)	GA, USA	Bedrijf met 7 vleeskuikenstallen, tunnel ventilatie, 193.900 dieren, leeftijd: 24–35 dagen	18–29 Aug '05	24–48 uur	PM2,5	24,0 ^c	In de stal: 58,6 ^{**} Op 30 m: 24,1 ^{n.s.} Op 91 m: 24,9 ^{n.s.} Op 152 m: 23,1 ^{n.s.}
Worley (2013)	GA, USA	Bedrijf met 3 vleeskuikenstallen, tunnel ventilatie, 94.000 dieren, leeftijd: 29–56 dagen	18 Jul–12 aug '07	22 uur	PM2,5	Ca. 31 ^c	In de stal: 71,7 [*] Op 30 m: 45,1 [*] Op 61 m: 36,3 ^{n.s.} Op 91 m: ca. 34 ^{n.s.} Op 152 m: ca. 32 ^{n.s.}
Li (2010)	NC, USA	Bedrijf met 4 vleeskuikenstallen, tunnel ventilatie, 86.000 dieren, leeftijd: 42–49 dagen	Jan '08	4 uur	Totaalstof	290 ^c	Op 4,6 m: 3848 Op 31–61 m: 978
Li (2012)	USA	Bedrijf met 9 leghennenstallen	Okt '08–jan '11	24 uur	PM2,5	10,7 ^c	Op 91 m: +0,61 [*]
					PM10	10,4 ^c	Op 153 m: +0,38 [*]
						22,3 ^c	Op 91 m: +4,98 [*]
						18,0 ^c	Op 153 m: +3,40 [*]
Varkens							
Hartung (1998)	D	Varkensstal met 1000 dieren, volledig roostervloer, brijvoeding	-	24 uur	Totaalstof	37	In de stal: 600 Op 50 m: 80 Op 115 m: 37
Martin (2008)	IA, USA	Bedrijf met 3 stallen ('deep pit'), nat. Gevent., 3750 dieren	3–8 Sep '05	23 uur	PM10	37,9 ^c	Tussen stallen: +25,1 Op 39 m: +15,8 Op 15–50 m: gem. +5,8
Thorne (2009)	IA, USA	Bedrijf met 3 open stallen met strooiselvloer, 600 dieren	15 maanden	4 uur	Inhaleerb.	ca. 50 ^a	In de stal: ca. 1050 ^{**} Op 30 m: ca. 500 ^{**} Op 160 m: ca. 300 ^{n.s.}
		Bedrijf met 1 stal ('deep pit' type), 1200 dieren	15 maanden	4 uur	Inhaleerb.	ca. 100 ^a	In de stal: ca. 1100 ^{**} Op 30 m: ca. 120 ^{n.s.} Op 160 m: ca. 130 ^{n.s.}

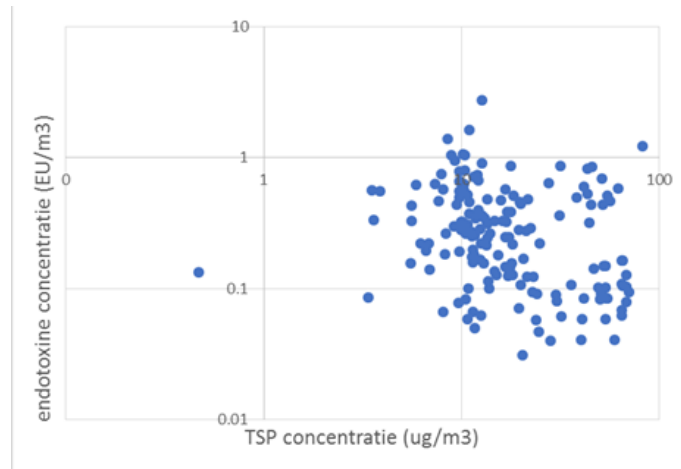
^a Meetkundig (geometrisch) gemiddelde, ^b mediaan, ^c rekenkundig gemiddelde

n.s. niet significant ($P > 0,05$), * significant ($P < 0,05$) en ** sterk significant ($P < 0,01$) verschillend van de concentratie bovenwinds

n.g.: niet gemeten

3.5 TSP: stalinvloed en vergelijking met modelberekening

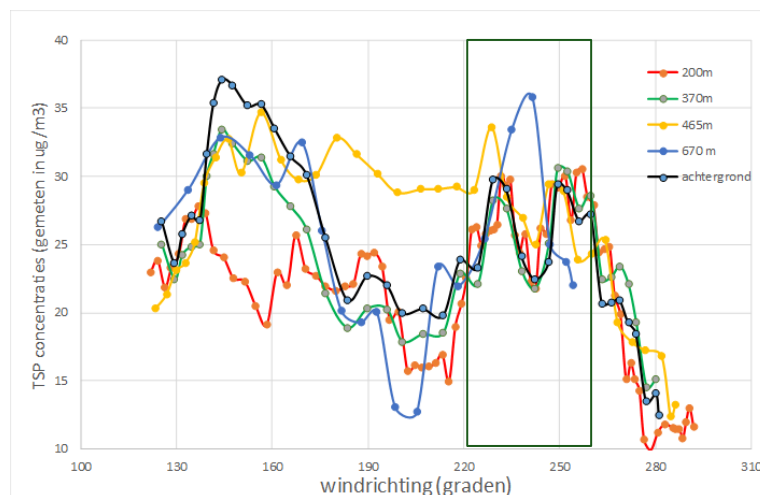
Ten aanzien van TSP (Total Suspended Particles) is eerst nagegaan of er een relatie bestaat tussen de TSP en endotoxine concentratie in de buitenlucht (alle afstanden tot de stal), zie figuur 3.6. Dit blijkt niet het geval te zijn.



Figuur 3.6 Relatie tussen de in het veld gemeten endotoxineconcentratie (Y-as) en de gemeten TSP concentratie (x-as).

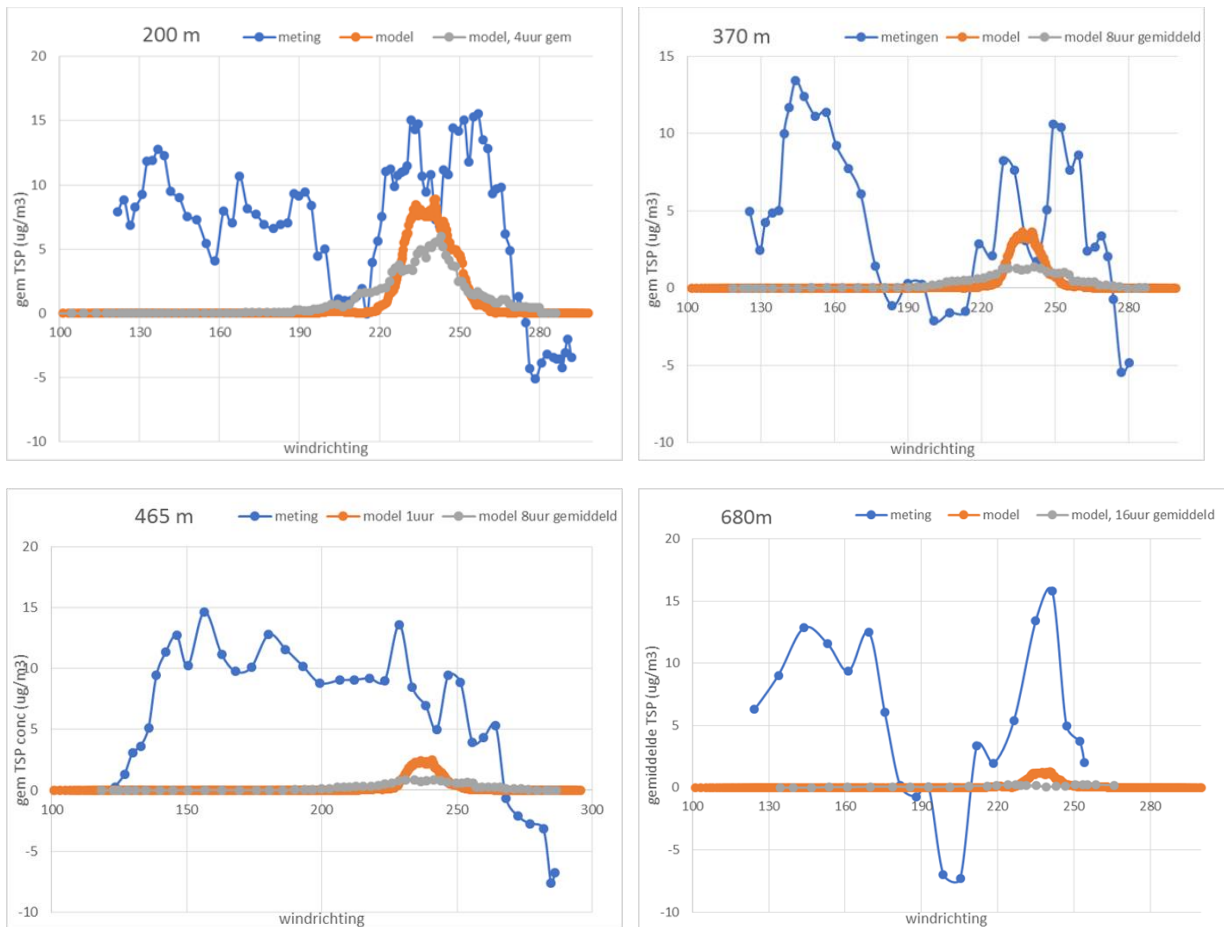
Op basis van de werkelijke (gemeten) emissies van PM₁₀₀ (zie bijlage C) zijn modelberekeningen uitgevoerd. Van de berekende uurgemiddelde TSP concentraties zijn windrozen gemaakt en deze zijn vergeleken met de windrozen van de concentraties gemeten benedenwinds van de stallen. Daarbij dient opgemerkt te worden dat de gemeten TSP concentraties steeds gemiddelden zijn over 4, 8, 16 of 24 uur, terwijl de modelwaarden steeds uurwaarden betreffen.

Wanneer de windrozen van de gemeten concentraties worden samengenomen in één figuur (zie figuur 3.7) is zichtbaar dat het lastig is om te spreken van een verval in TSP concentraties met de afstand bij windrichtingen waarbij de invloed van de stallen aanwezig moet zijn geweest. Ook de concentraties op het achtergrond meetpunt lopen vrijwel synchroon met de andere meetpunten. De gemiddelde TSP concentraties per meetpunt (op -100, 200, 370, 465, 680 en 835 m) zijn als volgt: 24,5; 23,2; 23,5; 26,0; 24,5 en 21,3 µg/m³. Hierin is geen enkele stalbijdrage zichtbaar.



Figuur 3.7 Gemeten TSP concentraties op vier meetpunten (meetpunt 2 op 200 m t/m meetpunt 5 op 680 m van de stal) gesorteerd naar windrichting. Het groene kader geeft de windrichtingen aan tussen 220 en 260° waarbij de wind over de stallen heen de meetpunten in het benedenwindse veld aanstreek.

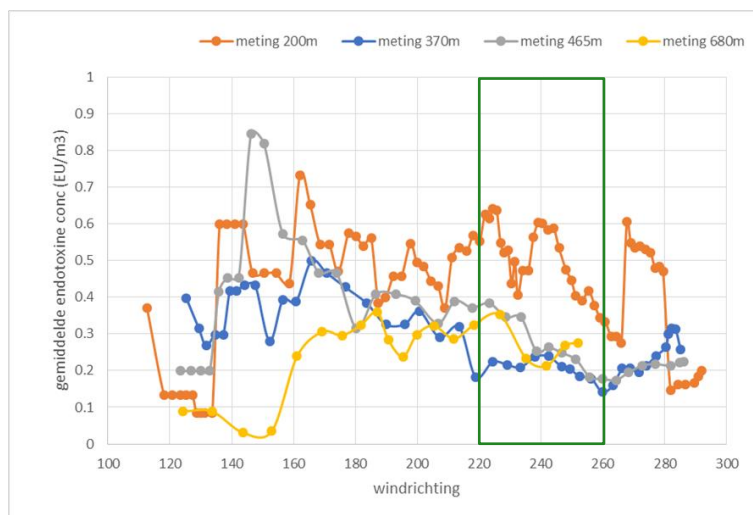
In figuur 3.8 zijn windroos van de gemeten en de berekende TSP concentraties weergegeven voor de meetpunten 200, 370, 465 en 680 m. Duidelijk is dat de bijdragen van de stallen bij zowel de modelberekeningen als metingen niet meer dan enkele $\mu\text{g}/\text{m}^3$ kunnen bedragen; dit is te weinig om een modelvalidatie te kunnen uitvoeren: de (ogenschijnlijk willekeurige) spreiding is daarvoor te groot en de stalbijdrage te klein. Merk op dat de stalbijdrage afneemt bij het toenemen van de bemonsteringsduur (middelingstijd) voor de verdere afstanden.



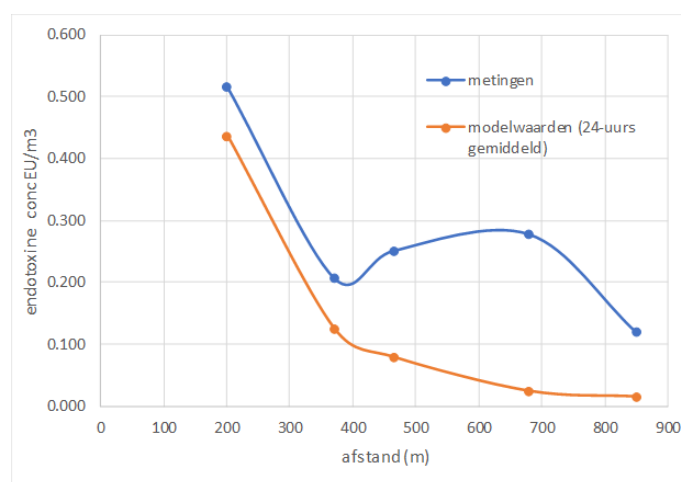
Figuur 3.8 Windroos van gemeten (blauw) en berekende (oranje, grijs) TSP concentraties op 200, 370, 465 en 680 m benedenwinds van de stallen. Oranje: uurgemiddelde modelwaarden; grijs: 4- tot 16-uursgemiddelde modelwaarden. Van de gemeten concentraties is arbitrair $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ afgetrokken (als geschatte achtergrond); dat maakt het plaatje beter vergelijkbaar (het gaat immers om het patroon).

3.6 Endotoxinen: stalinvloed en vergelijking met modelberekening

De modelvalidatie richt zich vooral op de concentraties van endotoxinen. Zoals in hoofdstuk 2 is uitgelegd bevindt het endotoxine zich in zowel de kleinere als de grovere deeltjes. Niet alle TSP beladen filters zijn op endotoxine geanalyseerd, alleen wanneer de samplingsperiode plaatsvond bij windrichtingen die voldoende interessant waren. Dat maakt dat er minder data voor endotoxine beschikbaar zijn dan voor TSP. De gemeten concentraties, gesorteerd naar windrichting, worden weergegeven in figuur 3.9. De gemeten concentraties hebben betrekking op 4-uursgemiddelden (200 m afstand), 8-uursgemiddelden (370 en 465 m), 16-uursgemiddelden (680 m) en 24-uursgemiddelden (835 m). De concentraties zijn met het rekenmodel over dit zelfde aantal uren gemiddeld om een goede vergelijking mogelijk te maken. De concentraties uit zowel de metingen als de modellering zijn gesorteerd op windrichting. Vervolgens zijn de concentraties gemiddeld over de windsector $220\text{-}260^\circ$. De gevonden concentraties zijn weergegeven in figuur 3.10.



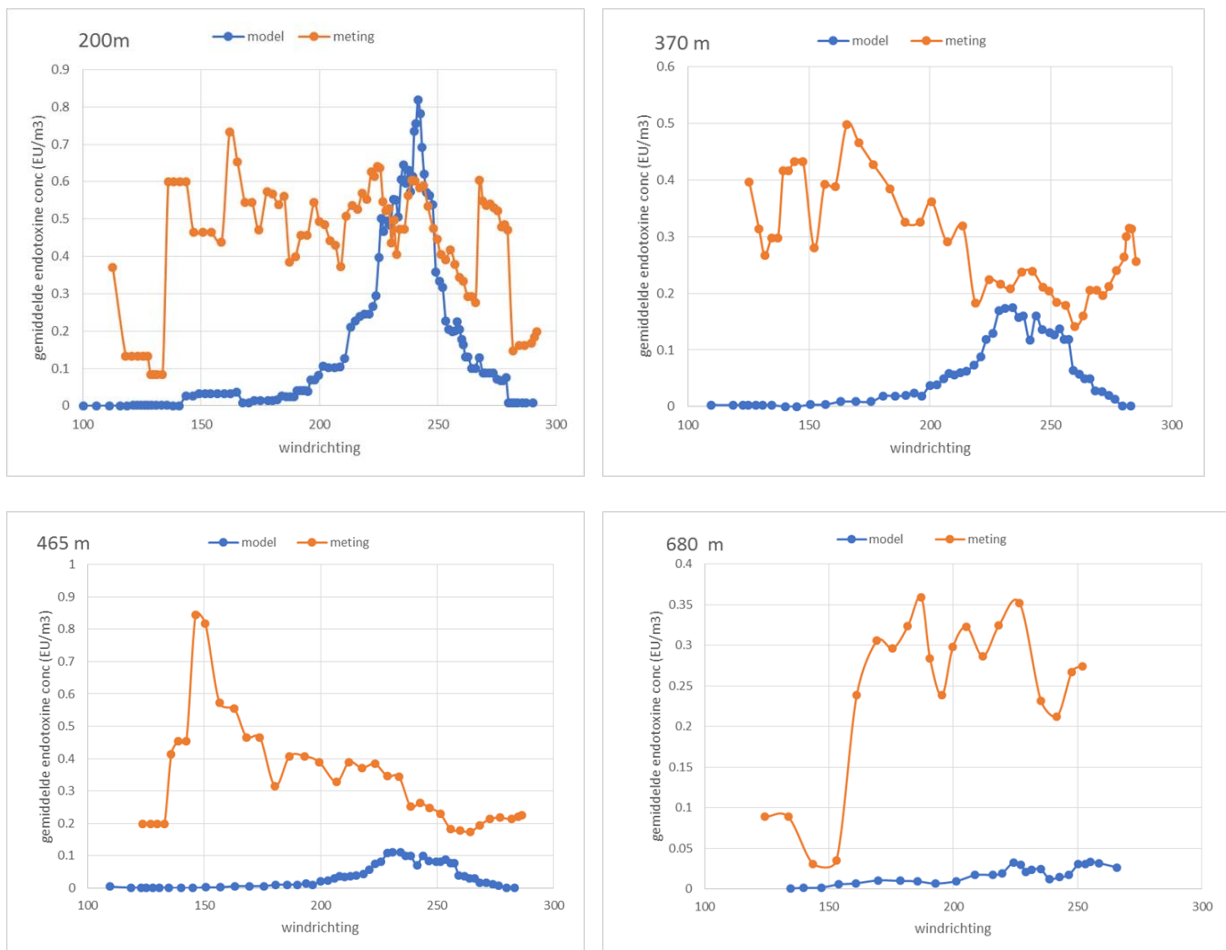
Figuur 3.9 Gemeten endotoxineconcentraties op vier meetpunten (meetpunt 2 op 200 m t/m meetpunt 5 op 670 m van de stallen, gesorteerd naar windrichting). Het groene kader geeft de windrichtingen aan tussen 220 en 260° waarbij de wind over de stallen heen de meetpunten in het benedenwindse veld aanstreek.



Figuur 3.10 Gemiddelde endotoxineconcentraties uit de metingen en uit de modellering bij windrichtingen tussen 220 en 260°.

Het lijkt erop dat het verval in endotoxineconcentratie van 200 naar 370 en vervolgens 835 m met elkaar overeenkomt. Echter, de gemeten concentraties op 465 en 685 m wijken af van de modeluitkomsten en de onzekerheid in de gemeten concentraties is te groot om een conclusie te trekken. Wat wel duidelijk is, is dat zowel de gemeten als berekende waarden laag zijn. Het lijkt er niet op dat het model een grote overschatting geeft.

De windrozen per afstand zijn weergegeven in figuur 3.11. Hierin is meer detail zichtbaar, met name waar het gaat om het verloop met de windrichting. Dit geeft hetzelfde beeld: de endotoxineconcentraties (gemeten en berekend) zijn allen laag ($<1 \text{ EU/m}^3$) en de variatiecoëfficiënt in de gemeten endotoxinewaarden derhalve te groot om deze met het rekenmodel goed te kunnen interpreteren. In de modelberekeningen is uiteraard bij windrichtingen uit zuidwest een verhoging zichtbaar ten gevolge van de stalemissies, maar deze is niet/nauwelijks terug te vinden in het gemeten beeld. Opgemerkt moet hier worden dat emissies van endotoxinen niet alleen vanuit de vleeskuikenstallen afkomstig kunnen zijn, maar ook van andere (onbekende) bronnen: er is dus sprake van een relevante (weliswaar toch nog lage) achtergrond. Dat maakt dat de waarden gemiddeld genomen (hoewel laag) hoger zijn dan de gemodelleerde waarden.



Figuur 3.11 Windroos van gemeten (blauw) en berekende (oranje; 4- tot 16-uursgemiddelde) endotoxine concentraties op 200, 370, 465 en 680 m benedenwinds van de stallen.

3.7 Ammoniak: stalinvloed en vergelijking met modelberekening

De concentraties van ammoniak in de atmosfeer, zoals gemeten door de meetstations van het Landelijke Meetnet Luchtkwaliteit gedurende de meetcampagne in dit onderzoek, zijn weergegeven in Bijlage D.

Ammoniak is uurlijks gemeten in de stallen zodat het model ook afzonderlijke uurwaarden voor de concentraties in het veld kon berekenen die samenhangen met de uurwaarden van de emissies. In het veld zijn met de adsorptiebuisjes echter gemiddelde waarden over twee á drie dagen gemeten.

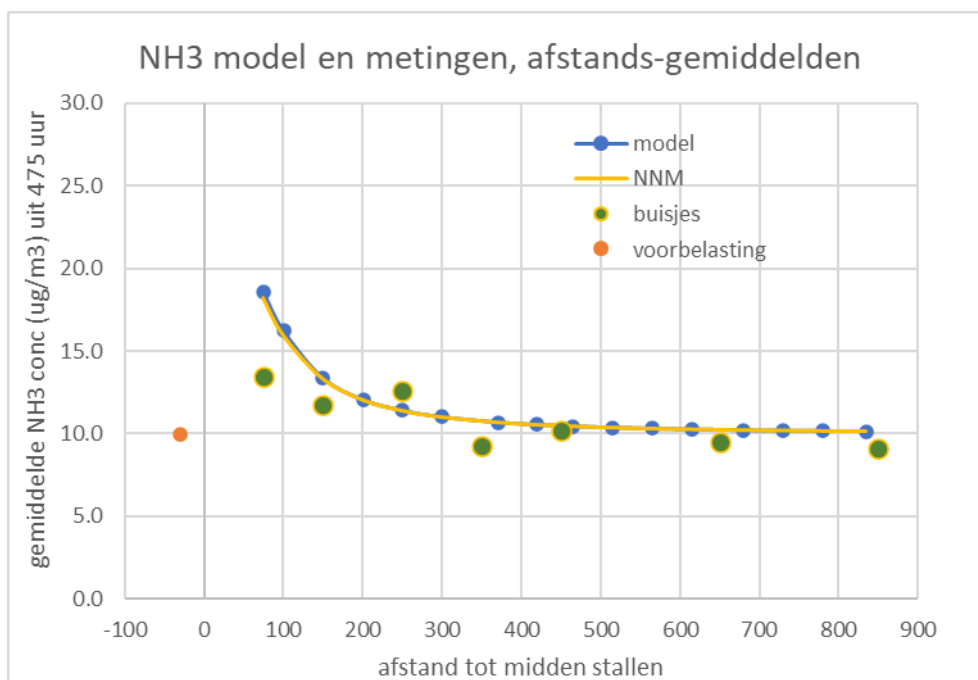
Eerst is de versie van Stacks voor endotoxinen gecheckt met de 'officiële' versie die in GeoMilieu is opgenomen. Voor endotoxinen zijn immers uitbreidingen doorgevoerd en een check op het originele model is steeds nuttig. In deze vergelijking is nog gerekend met een uittreesnelheid van 10 m/s (een hoge variant dus) en met vier emissiepunten. De warmte emissie wordt daarbij meegenomen en in een variant achterwege gelaten (als dat niet gedaan wordt zijn de berekende concentraties iets hoger). Bij het NNM is gerekend met een constante ammoniakemissie (gemiddeld over de hele periode) en voor de endotoxine versie met uurlijkse waarden van emissies zoals opgegeven. De resultaten gemiddeld over alle 476 uren zijn weergegeven in tabel 3.2.

Tabel 3.2 Ammoniakconcentraties benedenwinds van de stallen zoals berekend met de "endotoxine-versie", NNM en NNM zonder warmte-emissie (en het verschil tussen NNM met en zonder warmte-emissie, zonder de voorbelasting van 10 µg/m³).

Afstand	Ammoniakconcentratie (µg/m ³)			Verschil (%)
	Endotoxine-versie met warmte-emissie	NNM met warmte-emissie	NNM Zonder warmte-emissie	
49	27.1	25.1	35.9	71%
100	16.1	15.9	18.7	47%
150	13.3	13.3	14.3	30%
200	12.0	12.0	12.5	23%
250	11.4	11.4	11.7	20%
300	11.0	11.0	11.2	18%
370	10.7	10.7	10.8	16%
420	10.5	10.5	10.6	15%
464	10.4	10.5	10.5	14%
515	10.4	10.4	10.4	13%
565	10.3	10.3	10.4	12%
615	10.3	10.3	10.3	11%
680	10.2	10.2	10.2	8%
730	10.2	10.2	10.2	7%
779	10.2	10.2	10.2	7%
835	10.1	10.2	10.2	6%

Uit tabel 3.2 blijkt dat de endotoxine-versie van Stacks nog steeds goed overeen komt met het NNM; in de endotoxine-versie zijn geen fouten geslopen voor ammoniak en functioneert nog steeds prima.

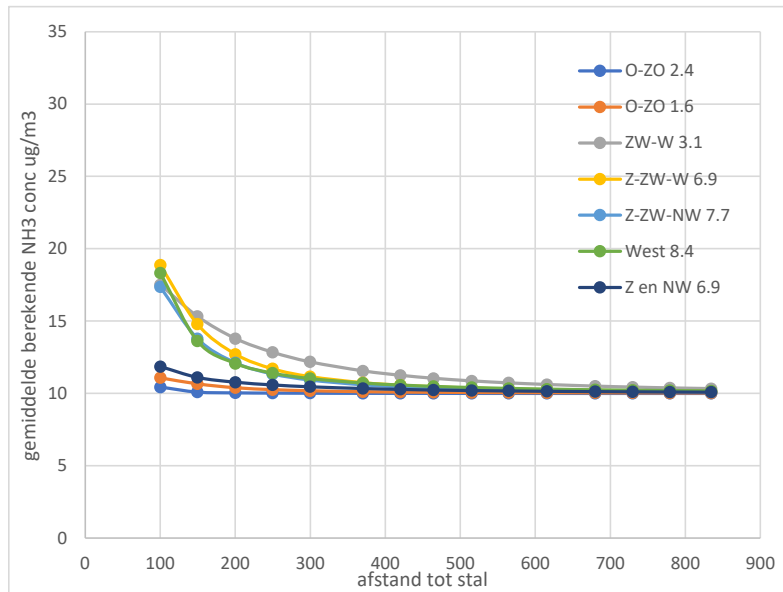
Vervolgens zijn de ammoniakconcentraties per meetpunt gemiddeld over de hele periode (dus alle uren en windrichtingen), zowel voor de metingen als voor de modeluitkomsten (dus uit bovenstaande tabel 3.2) en tegen elkaar uitgezet in figuur 3.12.



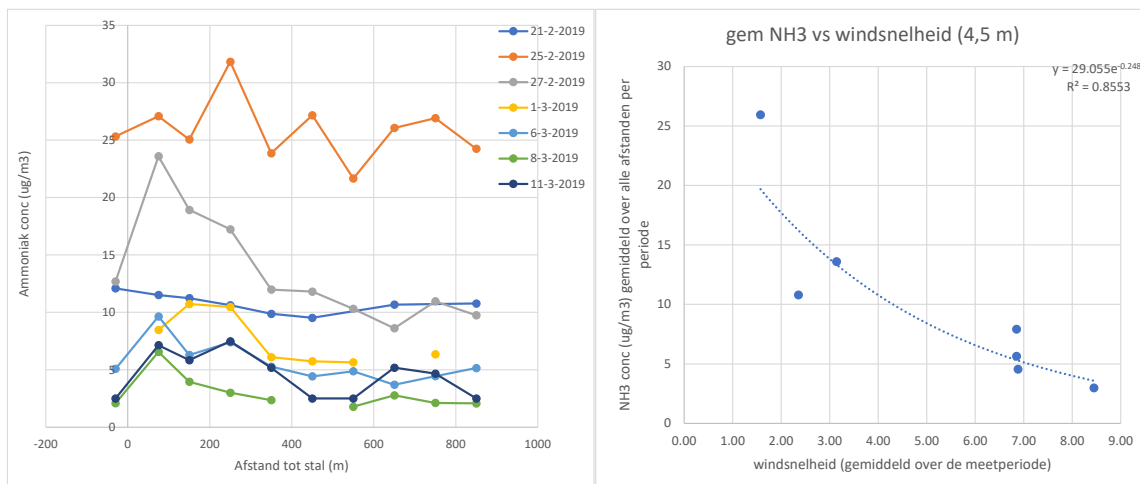
Figuur 3.12 Berekende ammoniakconcentraties met de endotoxine-versie (Stacks; blauw), het NNM (oranje) versus de gemeten waarden (ammoniak-adsorptiebuisjes; groen) tegen de afstand benedenwinds van de stallen, gemiddeld over de hele meetperiode.

Voor het model is het noodzakelijk een achtergrondconcentratie voor ammoniak op te geven. Hiervoor is een vaste waarde van 10 µg/m³ gehanteerd: de gemiddelde waarde op de meetlocatie ten zuidwesten van de stal (het bovenwindse meetpunt voor de meetlijn). Getest is of een andere waarde (5) andere uitkomsten geeft, dit bleek niet het geval te zijn.

Tenslotte zijn per sample-periode van de ammoniak-adsorptiebuisjes de modelwaarden bepaald en uitgezet tegen de afstand tot de stallen, zie figuur 3.13. Dit is ook gedaan voor de meetwaarden; deze zijn apart geplot in figuur 3.14. In de legenda in figuur 3.13 is tevens aangegeven wat de overheersende windrichting in die sample-periode is geweest. In figuur 3.14 betreft de legenda dezelfde perioden (kleuren komen dus overeen) als in figuur 3.13, maar nu is de einddatum van de sample-periode aangegeven.



Figuur 3.13 Berekende ammoniakconcentraties per sample-periode van de ammoniak-adsorptiebuisjes (zeven perioden; weergegeven inclusief overheersende windrichting en gemiddelde windsnelheid) tegen de afstand benedenwinds van de stallen.



Figuur 3.14 Links: gemeten ammoniakconcentraties per sample-periode van de ammoniak-adsorptiebuisjes uitgezet tegen de afstand tot de stal. Rechts: samenhang windsnelheid en gemiddelde ammoniakconcentratie (over alle afstanden per meetperiode).

Uit figuur 3.12 blijkt dat het model hogere concentraties berekent nabij de stallen (tot circa 5 á 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ op 100 m) die afnemen met de afstand. Deze trend wordt het meest uitgesproken berekend wanneer de overheersende windrichting zuidwest is en dus de stallen aanstrijkt en daarna de benedenwindse meetpunten (de lijnen blauw, grijs, groen en geel in figuur 3.13). Hoe meer de windrichting afwijkt van de ideale windsector voor deze studie (circa ZW), hoe meer voornoemde trend uitdooft t.g.v. minder stalinvloed op de benedenwindse meetpunten.

Uit figuur 3.14 blijkt dat voor de periode die de hoogste berekende waarden geeft (grijze lijn), ook een verval wordt waargenomen in de metingen: van een toename ten opzichte van de achtergrond van 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tot nul vanaf 400 m. Het verval in de berekende waarden in figuur 3.13 komt hiermee goed

overeen; voor de andere perioden is het verval met de afstand nauwelijks zichtbaar in de metingen. De modeluitkomsten tonen dichtbij de stal (100 m en kortere afstand) nog enigszins hogere concentraties; dit zijn de perioden met hogere windsnelheden; de verdunnende invloed van de stal lijkt hier sterker te zijn dan het model aanneemt. De gemiddelde gemeten ammoniak concentraties lijkt een sterke relatie te hebben met de windsnelheid.

Samenvattend voorspelt het rekenmodel lage ammoniakbijdragen van de stallen op de lijn vanaf de stal in noordoostelijke richting en de metingen bevestigen in grote lijnen dit beeld onder de gegeven omstandigheden.

4 Discussie, conclusies, aanbevelingen

4.1 Doel, werkwijze en hoofdbevinding

Het doel van dit onderzoek was het verkrijgen van inzicht in de mate van betrouwbaarheid van Stacks voor modellering van stofdeeltjes (alle fracties tot PM₁₀₀) en het endotoxine daarin, waarbij tevens ammoniak als gasvormige luchtverontreiniging uit stallen is meegenomen. Daarbij werd beoogd te focussen op de invloed van warmte-emissie, stalgeometrie en depositie van grotere deeltjes (groter dan 10 micrometer diameter). Geprobeerd is dit inzicht te verkrijgen door metingen uit te voeren van de lokale meteorologie rond, en emissie uit, een vleeskuikenbedrijf in een schone omgeving in Noord-Nederland nabij de kust en met weinig andere bronnen in de omgeving. De modeluitkomsten – d.w.z. concentraties van stofdeeltjes, endotoxinen en ammoniak rond het bedrijf – zijn vergeleken met veldmetingen op afstanden tussen 125 en 835 meter benedenwinds van de stallen.

4.2 Resultaten, verklaringen en conclusies op deelaspecten

Ten aanzien van de monitoring van de meteorologie en stalemissies als modelinput:

- De lokaal gemeten meteorologie kwam goed overeen met de meteorologie van het dichtstbijzijnde KNMI meetstation. Dit betekent dat in dit onderzoek de juiste perioden (met de benodigde windrichting) zijn geselecteerd.
- Tijdens de 133 bruikbare uren met zuidwestelijke windrichtingen was de windsnelheid vrij hoog: gemiddeld 8,2 m/s (5 Bft) met de hoogste uurwaarde 14,4 m/s (7 Bft).
- De ventilatiedebieten, concentraties van stof, endotoxinen en ammoniak en de emissies van deze stoffen (Bijlage C) lagen in lijn met de verwachting op basis van de emissiefactoren en waren consistent met de kennis over emissie bij vleeskuikens. De in dit onderzoek vastgestelde emissies van stoffen hebben het stalgebouw via de ventilatorkokers verlaten.
- Het gehalte van endotoxine in het stof uit het bedrijf lag aanzienlijk lager (namelijk een factor 4) dan vastgesteld voor vier vleeskuikenbedrijven in de meetcampagne van Winkel et al. (2018). Het lage endotoxinegehalte in het stof was reproduceerbaar in de tijd en tussen beide stallen van het bedrijf. Op basis van de bestaande kennis over endotoxine-emissies van stallen lijkt het bemeten bedrijf een zeer lage endotoxine-emissie te hebben gehad.

Ten aanzien van de bovenwindse en benedenwindse veldmetingen:

- De stalbijdrage aan de benedenwindse concentraties van TSP, de endotoxinen daarin, en PM₁₀ was weinig of niet zichtbaar in de veldmetingen.
- De hoge windsnelheid in de 133 bruikbare uren met zuidwestelijke wind kan de veldmetingen van TSP en PM₁₀, en daarmee endotoxinen, beïnvloed hebben. Het is mogelijk dat deeltjes bij deze hoge windsnelheden verminderd zijn ingevangen door respectievelijk de TSP-inlaat en de AirBoxen.
- De variatie in PM₁₀ meetwaarden van de verschillende AirBoxen was groter dan de berekende stalbijdrage. M.a.w. vermoedelijk is er gezocht naar verschillen tussen bovenwindse en benedenwindse PM₁₀ concentraties welke niet of nauwelijks boven de toevalsvariatie (meetruis) van de AirBoxen uitkwamen.
- Hoewel de stal verwacht werd als geïsoleerde stal in een schone omgeving te liggen, bleken alle achtergrondconcentraties relatief hoog te zijn ten opzichte van de stalbijdragen. Ondanks de afwezigheid van stallen binnen 1 km van de meetlocatie en het vooraf wegnemen van mogelijk versturende bijkomende bronnen op het bedrijfsterrein, kan niet helemaal uitgesloten worden dat de veldmetingen zijn beïnvloed door bijkomende lokale bronnen.

Ten aanzien van de vergelijking van de modelvoorspellingen met veldmetingen:

- De modelberekeningen voorspelden een stalbijdrage aan de PM₁₀-concentratie tot maximaal circa 5 µg/m³ op 125 m, 1,5 µg/m³ op 200 m en 0,9 µg/m³ op 370 m benedenwinds van de stallen (ter vergelijking: de concentratie van PM₁₀ in Nederland is jaargemiddeld ongeveer 20 µg/m³). Voor TSP berekende het model logischerwijze hogere massaconcentraties, maar ook deze bedroegen voor de doorgerekende omstandigheden maximaal 5 tot 8 µg/m³ (meetpunt 200 m). Deze bijdragen zijn in de metingen niet zichtbaar geworden. Voornoemde beperkte stalbijdragen op de gegeven afstanden vanaf 125 m zijn in lijn met de bijdragen gerapporteerd in de wetenschappelijke literatuur.
- De ammoniakconcentraties waren zowel in de meetresultaten als bij de modelberekeningen lager dan 5 µg/m³ vanaf afstanden meer dan 100 m (ter vergelijking: de concentratie van ammoniak in Nederland is jaargemiddeld 5-10 µg/m³). Dichtbij de stal (binnen 100 m) was de stalbijdrage in de metingen ook niet meer dan 5 µg/m³ terwijl de modelresultaten licht hogere waarden tonen. Mogelijk dat de gebouwinvloed iets sterker is dan het model aanneemt.
- De gemeten endotoxineconcentraties overstegen nooit het niveau van 1 EU/m³ en waren dus zeer laag. De gemodelleerde waarden lagen eveneens dicht bij nul.

Mogelijke aanscherpingen van de methodologie voor toekomstig onderzoek:

- Een groter bedrijf nemen: 2 stallen met samen 58.000 vleeskuikens is benedengemiddeld qua omvang (ca. 90.000 kuikens) en daarmee qua bronsterkte in het landschap. Een bedrijf van gemiddelde tot bovengemiddelde omvang zal beter zichtbaar worden in veldmetingen.
- Een leghennenbedrijf nemen: de emissie van een vleeskuikenbedrijf stijgt exponentieel van nul in de eerste dagen tot maximaal aan het einde van de groeiperiode van circa 7 weken. Daarna is de emissie afwezig gedurende de leegstandsperiode van circa 2 weken. Zo ontstaat een zaagtandpatroon in emissie door het jaar. Bij leghennenstallen is de emissie constant hoog. Daarnaast is de stof- en endotoxine-emissie per dierplaats groter waarmee eveneens gemakkelijker een grotere bronsterkte in het landschap wordt verkregen (zie eerste bullet)
- Het 24-uurspatroon in stofemissie vaker bepalen: in dit onderzoek is dit patroon op zes van de 21 dagen bepaald en voor de overige dagen verkregen via inter-/extrapolatie. Door dit vaker te doen, kan de nauwkeurigheid van de bronsterkte van het bedrijf verder worden vergroot.
- Voor alle stoffracties en ammoniak geldt dat in toekomstig onderzoek idealiter zou worden overgestapt op meer analytische meetmethoden met hoge gevoeligheid in het lage bereik en – voor ammoniak – daarnaast ook een hogere tijdsresolutie. Gedacht moet worden aan de apparatuur welke ook in het LML wordt ingezet (de Fidas-monitor voor PM en de mini-DOAS voor ammoniak). Dit vergt echter een forse inzet van dure en beperkt beschikbare apparatuur.
- Een meetcampagne over langere tijd uitvoeren (bijvoorbeeld 3-6 maanden). Hiermee wordt de kans verkleind dat hoge windsnelheden of andere (meettechnisch) versturende factoren prominent in de dataset aanwezig zijn of kunnen deze perioden worden geëxcludeerd uit de definitieve dataset.

4.3 Eindconclusie en aanbeveling

Resumerend laat de in dit onderzoek verkregen dataset van veldmetingen weinig toe om uitspraken te doen over de betrouwbaarheid van het Stacks model voor emissies uit stalgebouwen. Voor een goede modelvergelijking moeten de metingen voldoende spreiding (zowel hoge als lage bijdragen) laten zien. In dit onderzoek zijn geen (TSP, endotoxinen, PM₁₀) of relatief lage (ammoniak) bijdragen gevonden van het pluimveebedrijf op de benedenwindse concentraties. Het Stacks model voorspelde ook lage bijdragen. De modelkwaliteit is daarmee niet weersproken maar tegelijk onvoldoende aangetoond. Om alsnog het beoogde inzicht in de betrouwbaarheid van het Stacks model te verkrijgen wordt aanbevolen dit onderzoek te herhalen waarbij de ervaringen en verbeterpunten opgedaan in dit onderzoek worden benut.

Geciteerde bronnen

- ASG-KEMA (Projectgroep ammoniakdepositiemodel). 2007. AAgro-Stacks ammoniakdepositiemodel voor veehouderijen: modelbeschrijving, achtergronden en vergelijking. Wageningen: Animal Sciences Group. Arnhem: KEMA.
- Barad, M.L. (Editor). 1958. Project Prairie Grass, a field program in diffusion. Geophysical Research Paper, No. 59, Vol I, Report AFCRC-TR-58-235(I), Air Force Cambridge Research Center.
- Bowne N.E., Londergan, R.J. 1983. Overview, results and conclusions for EPRI Plume Model Validation and Development Project: Plains site. Available from EPRI, 3412 Hillview Avenue, Palo Alto, California 94304.
- Cambra-López, M., Winkel, A., Mosquera, J., Ogink, N.W.M., Aarnink, A.J.A., 2015. Comparison between light scattering and gravimetric samplers for PM10 mass concentration in poultry and pig houses. *Atmos. Environ.* 111:20–27.
- CIGR. 2002. 4th Report of Working Group on Climatization of animal houses. Heat and moisture production at animal and house levels (eds. Pedersen, S. and K. Sällvik). International Commission of Agricultural Engineering (CIGR), Section II.
- De Rooij, M.M.T., Heederik, D.J.J., Van Nunen E.J.H.M., Van Schothorst, I.J., Maassen, C.B.M., Hoek, H., Wouters, I. 2018. Spatial Variation of endotoxin concentrations measured in ambient PM10 in a livestock-dense area: implementation of a land-use regression approach. *Environments Health Perspectives* 126(1), 017003, 11 pp.
- Ellen, H., Mosquera, J., Hol, J.M.G., Huis in 't Veld, J.W.H., Nijeboer, G., Ploegaert, J.P.M., Ogink, N.W.M. 2013. Maatregelen ter vermindering van fijnstofemissie uit de pluimveehouderij: validatie van een warmtewisselaar op vleeskuikenbedrijven. Rapport 621. Lelystad: Wageningen UR Livestock Research.
- Erbrink, J.J. 2013. OPS – NNM: een vergelijking op concentraties en deposities. Arnhem: DNV-KEMA.
- Gezondheidsraad, 2012. Gezondheidsrisico's rond veehouderijen. Publicatie 2012/27. Den Haag: Gezondheidsraad.
- Hagenaars, T., Hoeksma, P., de Roda-Husman, A.M., Swart, A., Wouters, I. 2017. Veehouderij en Gezondheid Omwonenden (aanvullende studies). Analyse van gezondheidseffecten, risicofactoren en uitstoot van bioaerosolen. Rapport 2017-0062. Bilthoven: RIVM.
- Heederik D.J.J. & IJzermans, C.J. 2011. Mogelijke effecten van intensieve-veehouderij op de gezondheid van omwonenden: onderzoek naar potentiële blootstelling en gezondheidsproblemen. Utrecht: IRAS-UU. Utrecht: NIVEL. Bilthoven: RIVM.
- Heederik, D., Erbrink, H., Farokhi, A., Hagenaars, T., Hoek, G., Ogink, N., de Rooij, M., Smit, L., Winkel, A., Wouters, I. 2019. Risicomodellering veehouderij en gezondheid (RVG): modellering van regionale endotoxineconcentraties en relaties met gezondheidseffecten. Rapport IRAS UU 2019-01 / WBVR-1910304. Utrecht: Institute for Risk Assessment Sciences. Lelystad: Wageningen Bioveterinary Research.
- IJzermans, C.J., Smit, L.A.M., Heederik, D.J.J., Hagenaars, T.J. 2018. Veehouderij en gezondheid omwonenden III: longontsteking in de nabijheid van geiten- en pluimveehouderijen; actualisering van gegevens uit huisartspraktijken 2014-2016. Utrecht: NIVEL.
- Lai, H.T.L., Aarnink, A.J.A., Cambra-López, M., Huynh, T.T.T., Parmentier, H.K., Groot Koerkamp, P.W.G., 2014. Size distribution of airborne particles in animal houses. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 16:28–42.
- Maassen, K., Smit, L., Wouters, I., van Duijkeren, E., Janse, I., Hagenaars, T., IJzermans, J., van der Hoek, W., Heederik, D. 2016. Veehouderij en gezondheid omwonenden. Rapport 2016-0058. Bilthoven, Nederland: RIVM.
- Ogink, N.W.M., Erbrink, J.J., Heederik, D.J.J., Winkel, A., Wouters, I.M. 2016. Emissies van endotoxinen uit de veehouderij: emissiemetingen en verspreidingsmodellering. Rapport 959. Wageningen: Wageningen UR Livestock Research.
- Pedersen, P., Løftstrøm, P., Andersen, H.V. 2007. Ammoniakspredning omkring en svineproduktion. Danske Svineproduktion.

-
- Pedersen, S., Blanes-Vidal, V., Joergensen, H., Chwalibog, A., Haeussermann, A., Heetkamp, M.J.W., Aarnink, A.J.A. 2008. Carbon dioxide production in animal houses: a literature review. *Agricultural Engineering International: CIGR Ejournal*, Vol. X, December 2008. Manuscript BC 08 008.
- Rijksoverheid. 2013. Toekomst van de intensieve veehouderij. Brief van de staatssecretaris van economische zaken aan de Voorzitter van de Tweede Kamer der Staten-Generaal. Kamerstuk 28793, nr. 143.
- Smit, L., Huss, A., Jacobs, J., Baliatsas, C., Dückers, M., Boender, G.J., McCarthy, C., Hagens, T., IJzermans, J., Heederik, D. 2020. VGO-III. Longontsteking in de nabijheid van veehouderijen in Gelderland, Overijssel en Utrecht. Utrecht: IRAS Universiteit Utrecht, NIVEL en WBVR.
- Smits, M.C.J., Van Jaarsveld, J.A., Mokveld, L.J., Vellinga, O., Stolk, A., Van der Hoek, K.W., Van Pul, W.A.J. 2005. Het Veld project, een gedetailleerde inventarisatie van de ammoniakemissies en -concentraties in een agrarisch gebied. A&F Rapport 429. RIVM Rapport 500033002. Wageningen: Wageningen UR, Agrotechnology & Food Innovations. Bilthoven: Rijkinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- Theobald, M.R., Løftstrøm, P., Andersen, H.V., Pedersen, P., Walker, J., Vellejo, A., Sutton, M.A. 2010. An intercomparison of models used to simulate the atmospheric dispersion of agricultural ammonia emissions. Page 85-89 in: *The 13th Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (HARMO13)*; June, 1-4, 2010; Paris, France.
- Van Jaarsveld, J.A. 2004. The Operational Priority Substances model. Description and validation of OPS-Pro 4.1. RIVM report 500045001-2004. Bilthoven: Rijkinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- Van Pul, W.A.J., Van Jaarsveld, J.A., Vellinga, O.S., Van den Broek, M., Smits, M.C.J. 2008. The VELD experiment: an evaluation of the ammonia emissions and concentrations in an agricultural area. *Atmospheric Environment* 42:8086-8095.
- Walker, J., Spence, P., Kimbrough, S., Robarge, W. 2008. Inferential model estimates of ammonia dry deposition in the vicinity of a swine production facility. *Atmos. Environ.* 42:3407-3418.
- Winkel, A., Wouters, I.M., Aarnink, A.J.A., Heederik, D.J.J., Ogink, N.W.M. 2014. Emissies van endotoxinen uit de veehouderij: een literatuurstudie voor ontwikkeling van een toetsingskader. Rapport 773. Wageningen: Wageningen Livestock Research.
- Winkel, A., Llorens Rubio, J., Huis in't Veld, J.W.H., Vonk, J., Ogink, N.W.M., 2015a. Equivalence testing of filter-based, beta-attenuation, TEOM, and light-scattering devices for measurement of PM10 concentration in animal houses. *J. Aerosol Sci.* 80:11-26.
- Winkel, A., Mosquera, J., Groot Koerkamp, P.W.G., Ogink, N.W.M., Aarnink, A.J.A., 2015b. Emissions of particulate matter from animal houses in the Netherlands. *Atmos. Environ.* 111:202-212.
- Winkel, A., Erbrink, J.J., Wouters, I.M., Huis in 'T Veld, J.W.H., Heederik, D.J.J., Ogink, N.W.M. 2018. Emissies van endotoxinen uit de veehouderij: eindrapport endotoxine metingen. Rapport 1092. Wageningen: Wageningen Livestock Research.

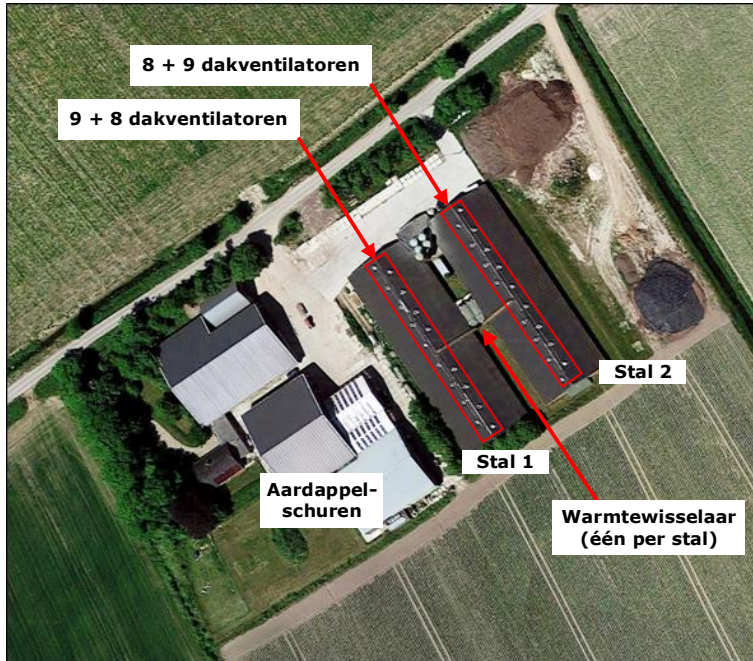
Bijlage A: overzicht validatiestudies Stacks en OPS

Studie	Model(len)	Emissiebron(nen)	Studiegebied	Metingen	Comp.	Resultaten/conclusies
Van Jaarsveld (1994): validatie op de "Kincaid" dataset	OPS, v4	Eén schoorsteen van kolencentrale in Kincaid, USA (h=187m); bestaande dataset (Bowne & Londergan, 1983)	Lokaal rond een schoorsteen, <12 km	-	SO ₂	- goede overeenkomst tussen model en metingen (middeliningsduur 1 mnd) rond Y=x - correlatie: r van 0.6-0.7
Smits et al. (2005): het "VELD-project"	OPS-ST (korte termijn)	Vele tientallen stallen en percelen rond dorp Vragender, NL (juli '02-sept. '03)	Regionaal, 3x3 km	- 50 locaties met NH ₃ -adsorptiebuisjes (middeliningsduur: 2 wk; t.b.v. spatiele aspecten) - Continue veldmeting NH ₃ met DOAS/AMOR op meetstations op centrale en decentrale locatie (uurwaarden; t.b.v. temporele effecten) - Meteorologiemast op decentrale meetstation - Stalbezetting en mesttoediening bij agrariërs/loonwerkers	NH ₃	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Buiten mesttoedieningsseizoen:</i> - dagverloop: model onderschat tussen 08:00 en 15:00, daarbuiten goede overeenkomst - goede overeenkomst tussen model en metingen (RC=0.92, 0.94; R²=0.6) voor daggemiddelden (temporele variatie) - goede overeenkomst tussen model en metingen voor ca. 50 ruimtelijke gemiddelden (RC=0.96; R²=0.7; middeliningsduur ca. 10 weken) • <i>Tijdens mesttoedieningsseizoen:</i> - systematische onderschatting door model (RC=0.53, 0.59; R²=0.66, 0.67) voor daggemiddelden (temporeel) - dagverloop model loopt op lager niveau in dezelfde trend mee met metingen - systematische onderschatting door model voor ca. 50 ruimtelijke gemiddelden (RC=0.67; R²=0.71; middeliningsduur ca. 15 weken) • <i>Over gehele gebied en tijdsduur:</i> - "ammoniakgat": model onderschat metingen met circa 15% o.b.v. gebiedspecifieke meteorologie, emissies, enzovoort, en circa 33% uitgaande van specifieke brondata
ASG-KEMA (2007): validatie Stacks op de dataset van het "VELD-project"	Stacks, v6.2 (zonder depositie)	Zie Smits et al. (2005)	Zie Smits et al. (2005)	Zie Smits et al. (2005)	NH ₃	Redelijke overeenkomst tussen model en metingen (RC=1.36) voor daggemiddelden (temporele variatie) van centrale en decentrale NH ₃ -meetstation VELD-project
Theobald et al. (2010): validatie vier modellen aan twee datasets	OPS-ST, ADMS, AERMOD en LADD; alle zonder natte depositie, gebouweffecten en terrein-effecten	Eén natuurlijk geventileerde varkensstal in Falster, DK (bestaande dataset Pedersen et al., 2007)	Lokaal; rond één stalbron	Veldmetingen van NH ₃ gedurende 3 maanden op 27 locaties rond de stal, met diffusiebuisjes (middeliningsduur: week). Tevens continue meting van stalemissie en lokale meteorologie	NH ₃ (range: 0-5 µg/m ³)	- Alle modellen berekenen concentraties die rechtlijnig samenhangen met gemeten waarden, maar niveau en steilheid van de regressies variëren tussen de modellen - Bij concentraties tussen 0 en 1 µg/m ³ overschat OPS-ST, tussen 1 en 5 µg/m ³ lijkt er geen systematische bias maar is de spreiding groter
		Vijf mechanisch geventileerde varkensstallen in NC, USA (bestaande dataset Walker et al., 2008). Tevens mest-lagoon aanwezig	Lokaal; rond één stalbron	Veldmetingen van NH ₃ gedurende een volledig kalenderjaar (2004) rond de stal, met diffusiebuisjes (middeliningsduur: week). Tevens continue meting lokale meteorologie. Stalemissies zijn echter geschat m.b.v. emissiefactoren	NH ₃ (range: 0-100 µg/m ³)	- Alle modellen berekenen concentraties die rechtlijnig samenhangen met gemeten waarden. Datapunten liggen echter grotendeels boven de Y=x lijn, d.w.z. de modellen overschatten t.o.v. gemeten waarden met ruwweg een factor 2. - Gevoeligheidsstudie: modellen blijken onderling weinig te verschillen bij laze (0 m), iets meer bij hoge (20 m), maar met name bij tussenliggende emissiehoogtes - Auteurs concluderen dat OPS-ST, ADMS en AERMOD "acceptabel" functioneren
Erbrink et al. (2013): validatie Stacks aan twee datasets: "Falster" en "Prairiegrass"	Stacks/NNM, met gebouweffecten	Eén natuurlijk geventileerde varkensstal in Falster, DK (bestaande dataset Pedersen et al., 2007)	Lokaal; rond één stalbron	Veldmetingen van NH ₃ gedurende 3 maanden op 75, 100 en 300 m rond de stal in acht richtingen, met diffusiebuisjes (middeliningsduur: week). Tevens continue meting van stalemissie en lokale meteorologie	NH ₃ (range: 0-5 µg/m ³)	- Concentraties nemen af met afstand (gem. 5, 2.2 en 1.4 µg/m ³ op respectievelijk 75, 100 en 300 m) - Goede overeenkomst tussen model en metingen: datapunten liggen rond Y=x met acceptabele spreiding - Het niet meenemen van gebouweffecten leidt tot onderschatting t.o.v. gemeten waarden, met name op 75 en 150 m
	Stacks/NNM	Een kunstmatige, laze (0,48m) tracergas-puntbron op een grasvlakte in O'Neill, Nebraska, USA (Barad, 1958). Totaal 70 emissieruns van elk 10 min met verschillende bronsterkte	Lokaal; op een vlak en gemaaid grasveld van een vierkante mijl	Veldmetingen van SO ₂ op afstanden van 50, 100, 200, 400 en 800 m van de puntbron in vijf richtingen, op 1,5 m hoogte (middeliningsduur: 10 min)	SO ₂	Uitstekende overeenkomst tussen model en metingen (RC=1.01, R ² =0,9)

Heederik et al. (2019): validatie Stacks aan dataset uit "VGO-1 studie" (Maassen et al., 2016; hfdst. 7)	Stacks	Duizenden stallen in het VGO-gebied; o.b.v. locatie, diercategorie, stalsysteem, aantal dieren en emissiefactoren	Regionaal; voor 61 meetpalen verspreid in het "VGO-gebied"	Veldmetingen van PM ₁₀ en het endotoxine daarin op 61 meetlocaties in het VGO-gebied (middellingsduur: 2 wk) gedurende ca. een jaar	Endotoxine in PM ₁₀	<ul style="list-style-type: none"> - Endotoxine, ruimtelijke variatie: goede overeenkomst tussen model en metingen o.b.v. jaargemiddelden per meetlocatie, mits warmte-emissie uit de stalgebouwen wordt meegenomen. Zonder warmte-emissie circa een factor 2,5 overschatting - Endotoxine, ruimtelijke én temporele variatie: matige overeenkomst tussen model en metingen o.b.v. 2-wk gemiddelden per meetlocatie (warmte-emissie meegenomen)
--	--------	---	--	--	--------------------------------	---

Bijlage B: beschrijving meetlocatie

Luchtfoto bedrijfssituatie



Overzicht van de ventilatieregeling, emissiepunten en stalmeetpunten



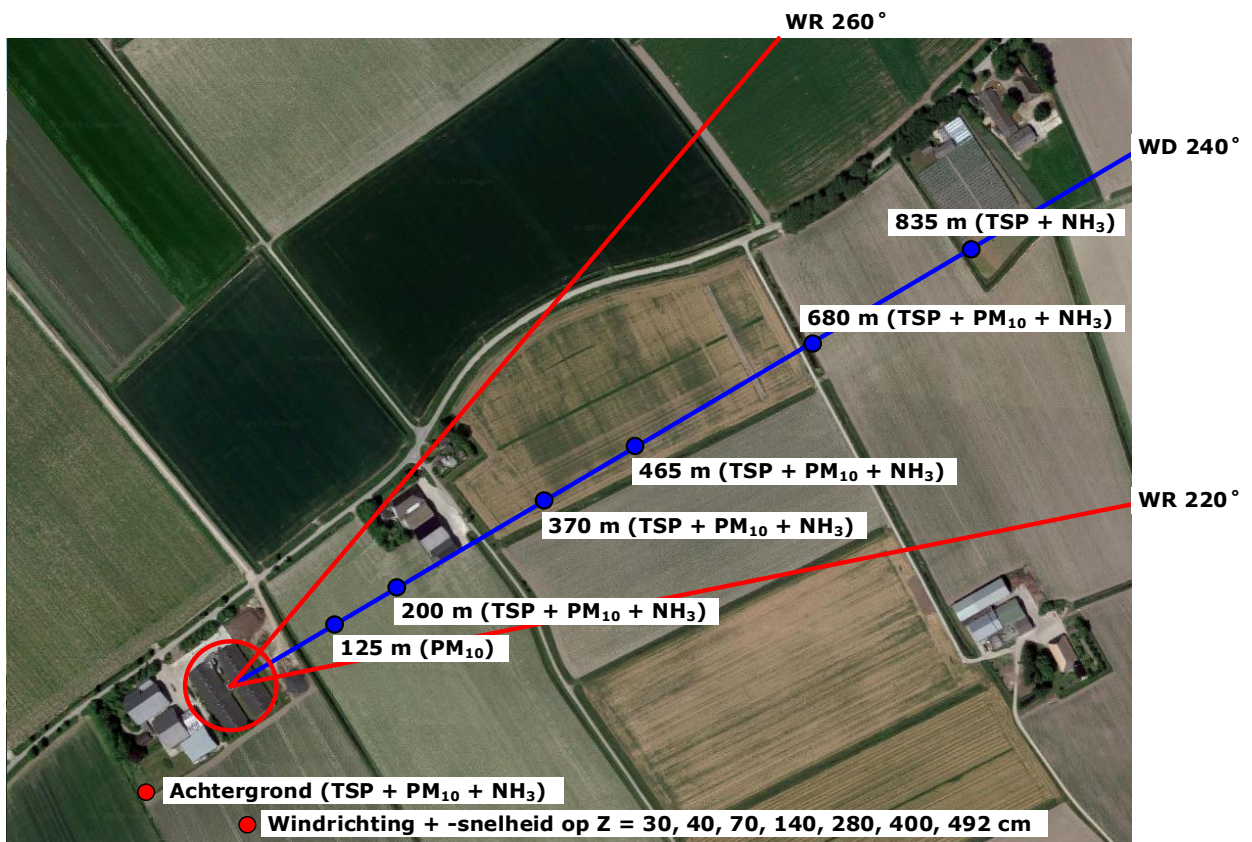
- Schoorsteen warmtewisselaar frequentiegestuurd (stap 1)
- Dakventilator frequentiegestuurd (stap 2a)
- Idem; meetpunt PM_{xx} , NH_3 en CO_2
- Dakventilator aan/uit-gestuurd (stap 2b)
- Eindgevelventilator aan/uit-gestuurd (stap 3)
- Postie luchtpompen, wasflessen, etc.

Inventarisatie emissiebronnen nabij (bovenwinds van) de meetlocatie



Veld benedenwinds (noordoost) van de meetlocatie

Uitgaande van meten bij zuidwestelijke wind



Stalbeschrijving

Kenmerk	Beschrijving
<i>Stal</i>	
Bouwjaar	1995
Rav code en omschrijving	E 5.11: stal met luchtmengsysteem voor droging strooisellaag in combinatie met een warmtewisselaar (BWL 2010.13.V6)
Emissiefactoren	Emissie PM10: 22 g/dierplaats per jaar Emissie ammoniak: 0,021 kg/dierplaats per jaar Emissie geur: 0,33 OU _E /dierplaats per seconde
Afmetingen (l × b × h _{goot} /h _{nok})	75 x 25 x 2,5/6 m
Oriëntatie van de stal	NW (voorgevel) – ZO (achtergevel)
<i>Dieren</i>	
Aantal kuikens bij opzet	Ca. 29.000 per stal, ca. 58.000 voor beide stallen
Bezettingsgraad bij opzet	Ca. 15,5 kuikens per m ² strooiselvloeroppervlak
Merk kuiken	Ranger (Aviagen)
<i>Klimaatregeling</i>	
Beschrijving luchtinlaat	Via Agrosupply warmtewisselaar (capaciteit: 18.000 m ³ /h = 0,6 m ³ /h per dier) en via inlaatventielen in beide zijgevels (101 + 103 stuks). De voorverwarmde lucht uit de warmtewisselaar wordt gemengd d.m.v. zes circulatieventilatoren
Beschrijving luchtuitlaat	Combinatie van warmtewisselaar, nokventilatie en lengteventilatie: <ul style="list-style-type: none"> • Warmtewisselaar (max. 18.400 m³/uur) • 9 nokventilatoren in het buitenste dakvlak + 8 ventilatoren in het binnenste dakvlak, totaal 17 stuks (Ø ca. 75 cm, elk max. ca. 12.500 m³/uur). Oorspronkelijk waren er 18 dakventilatoren aanwezig. In het binnenste dakvlak is één ventilatieschacht opgeofferd voor het luchtkanaal vanuit de warmtewisselaar. Vier van de 17 dakventilatoren zijn frequentiegestuurd. De overige 13 zijn aan/uit-geregeld • 3 v-snaarventilatoren in de eindgevel (aan/uit-geregeld), Ø 130 cm, elk max. ca. 40.000 m³/uur
Ventilatieopbouw door ronde	Totale capaciteit warmtewisselaar + nokventilatie: ca. 230.900 m ³ /uur (ca. 8,0 m ³ /uur per kuiken) Bij aanvang van de ronde wordt geventileerd met de warmtewisselaar. Vervolgens komen de vier frequentiegestuurde dakventilatoren erbij. Vervolgens wordt één of meerdere aan/uit-gestuurde dakventilatoren bijgeschakeld en vallen de frequentiegestuurde dakventilatoren terug in toerental om het totaal precies af te regelen op de ventilatiebehoefte. Alleen tijdens warme dagen en grote kuikens worden de drie eindgevelventilatoren bijgeschakeld
Ventilatieregeling Temperatuurinstellingen	Hotraco Orion klimaatcomputer, ventilatie op basis van staltemperatuur Dag 0: ca. 33–34 °C Dag 7: ca. 29,5 °C Dag 14: ca. 28 °C Dag 21: ca. 26 °C Dag 28: ca. 24 °C Dag 35: ca. 22 °C Daarna tussen 18 en 22 °C, afhankelijk van de buitentemperatuur
Verwarmingssysteem	Vier direct gestookte propaanheaters per stal (PRIVA, type DAP-6-45)
<i>Bedrijfsvoering</i>	
Beschrijving houderijsysteem	Grondhuisvesting
Beschrijving voersysteem	Vier voerlijnen met voerpannen
Voertijden	Onbeperkt
Voer	Vleeskuikenvoer (ForFarmers Hendrix, Delden) in vier fasen: Fase 1: 19,1% Re / 5,7% Rv / 4,0% Rcs / 6,4% Ras Fase 2: 18,5% Re / 5,6% Rv / 3,4% Rcs / 5,6% Ras Fase 3: 17,2% Re / 7,1% Rv / 4,3% Rcs / 5,0% Ras Fase 4: 16,7% Re / 6,9% Rv / 4,5% Rcs / 4,6% Ras
Beschrijving drinkwatersyst.	Vier drinklijnen met nippels met lekschoteltjes
Drinktijden	Onbeperkt
Strooiselmanagement	De stal wordt ingestrooid met stro-pallets
Beschrijving verlichting	Negen armaturen met natriumhogedrukklampen in de nok + 19 TL-armaturen aan de dakvlakken
Lichtregime	Dag 0 t/m 14: aanvankelijk 24L:0D, geleidelijk afbouwend in de eerste twee weken naar 21L:3D. Duister van 12:00-15:00. In de laatste week van de ronde weer opbouwend naar 24L:0D vanwege het vangen van de kippen in het licht.
Schoonmaakregime	1) verwijderen mest met een verreiker, 2) inzepen, 3) schoonspuiten, 4) ontsmetting met Virocid
<i>Productiecyclus</i>	
Leeftijd en gewicht bij ruimen	Tijdens de ronde wordt niet tussentijds uitgeladen. Er wordt wegladen op ca. 50 dagen leeftijd en ca. 2400 gram
Leegstand tussen koppels	Ca. 7 dagen

Foto's vleeskuikenbedrijf



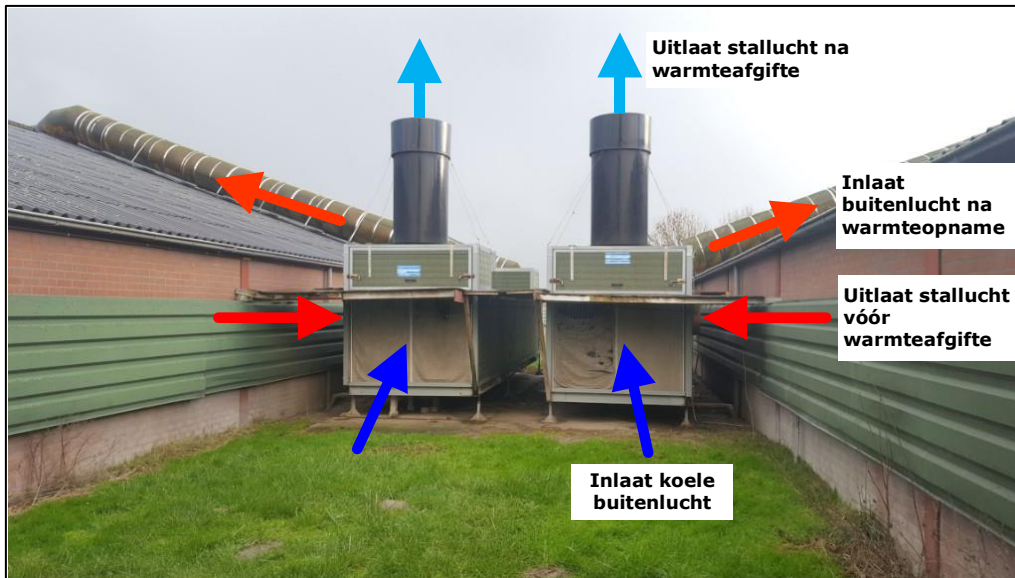
Beide stallen met toegangsgebouw ertussenin



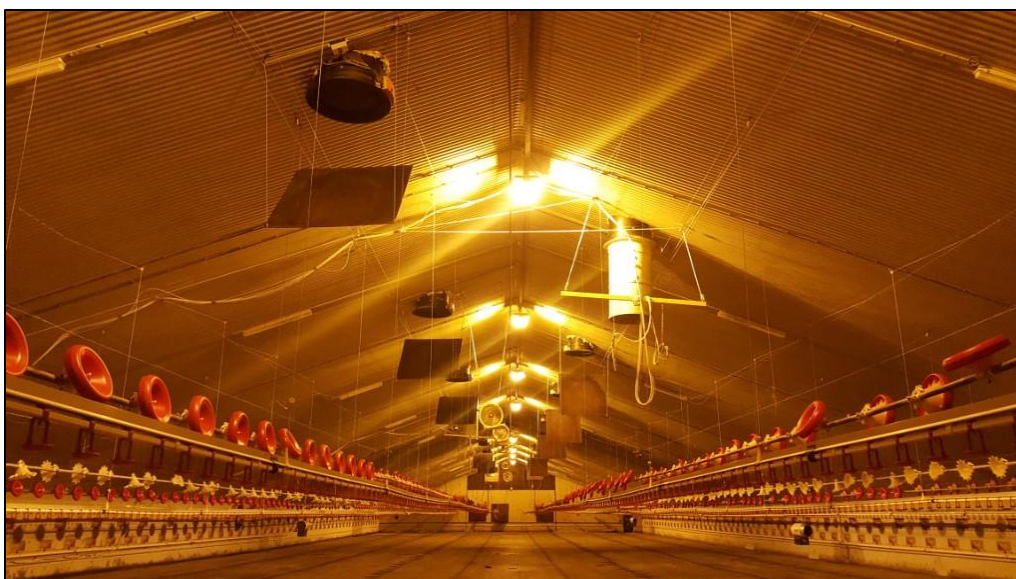
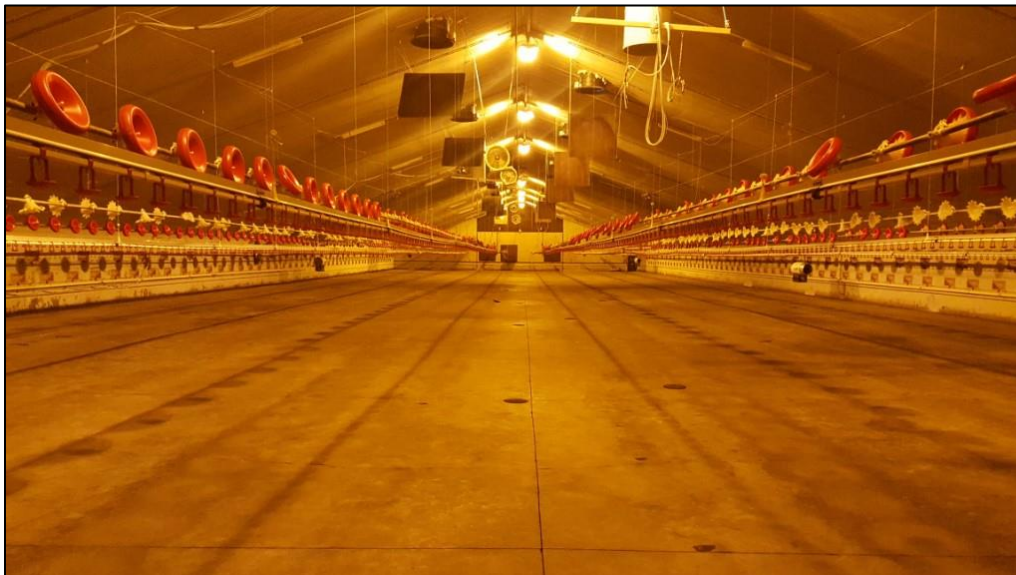
Westelijke zijgevel en achtergevel van stal 2 met kap over de drie eindgevelventilatoren



Ruimte tussen beide stallen met twee warmtewisselaars (foto genomen vanaf achterzijde)



Ruimte tussen beide stallen in met twee warmtewisselaars (foto genomen vanaf voorzijde)



Overzichtsfoto's van de stal (genomen van voor naar achter). Zichtbaar zijn de opgelierde lijnen met rode voerpannen en lijnen met drinknippels, nokventilatoren met zwarte schacht (aan/uit-ventilatoren), nokventilatoren met witte schacht (frequentiegestuurd/variabel), geeloranje natriumhogedrukverlichting in de nok en TL-armaturen (uitgeschakeld) aan de dakvlakken



Eén van de vier propaanheaters per stal



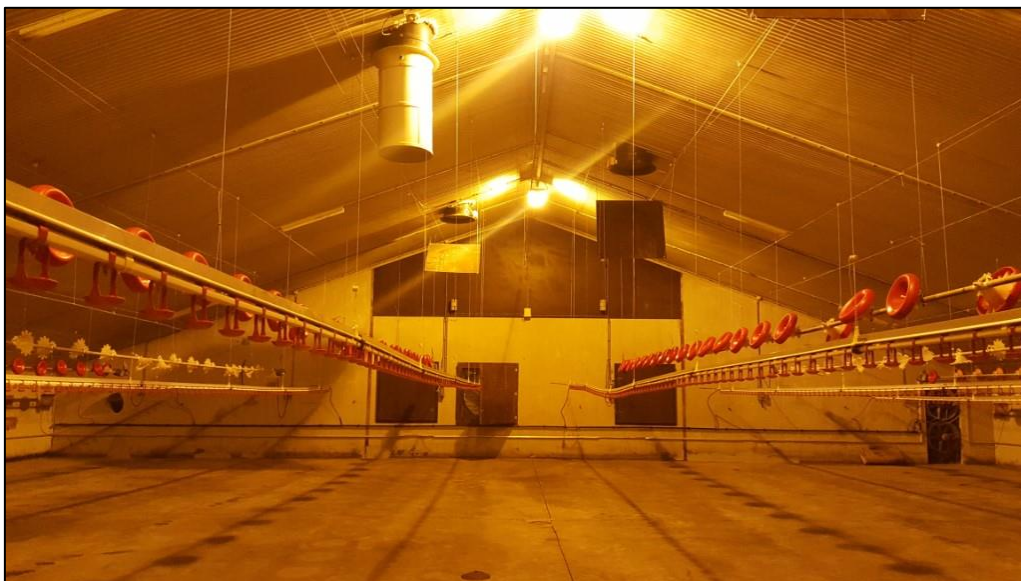
Inlaat van de voorverwarmde buitenlucht uit de warmtewisselaar naar de stal



Inlaat van de warme/vuile stallucht naar de warmtewisselaar. Tevens inlaatventielen en drinklijn zichtbaar



Eén van de zes witte steunventilatoren (t.b.v. verdeling lucht uit warmtewisselaar)



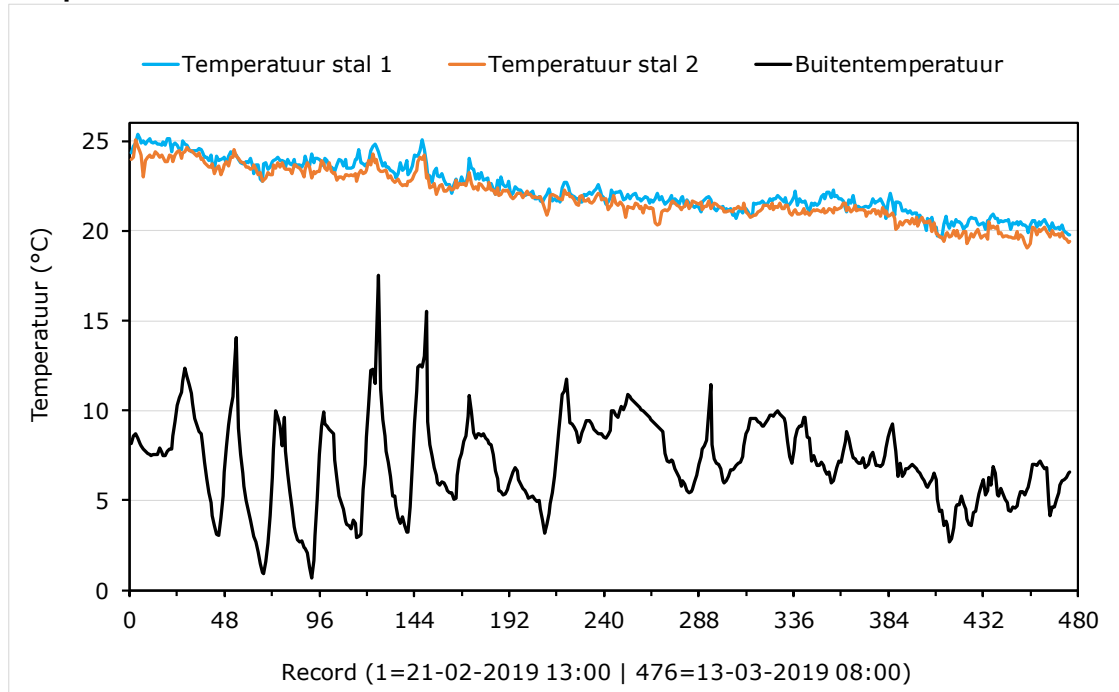
Eindgevel van de stal met drie ventilatoren (achter de houten deuren)



Oplierbare balk met monsternameleidingen en ophangpunten voor meetapparatuur

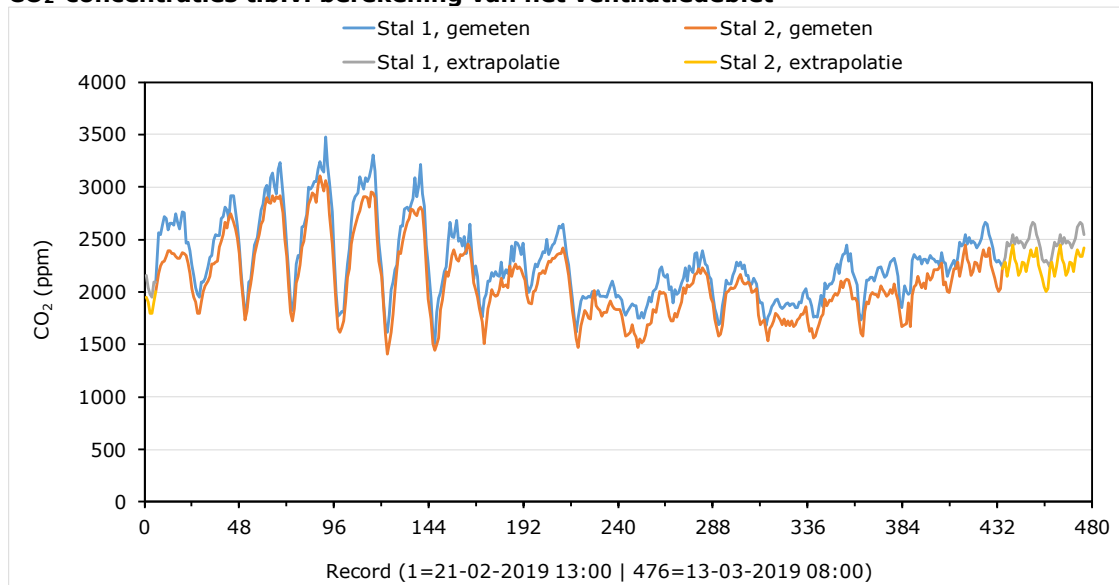
Bijlage C: resultaten stalmetingen als modelinvoer

Temperatuur

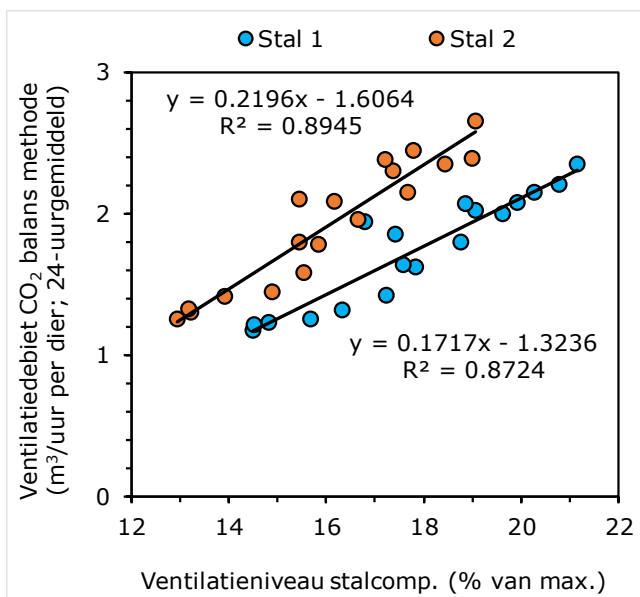


Figuur C.1 Resultaten van de temperatuurmeting in stal 1 en stal 2, alsook de buitentemperatuur gemeten door een buitensensor verbonden aan de stalcomputer op het bedrijf. Deze data zijn gebruikt om de warmte-emissie uit de stallen te modelleren.

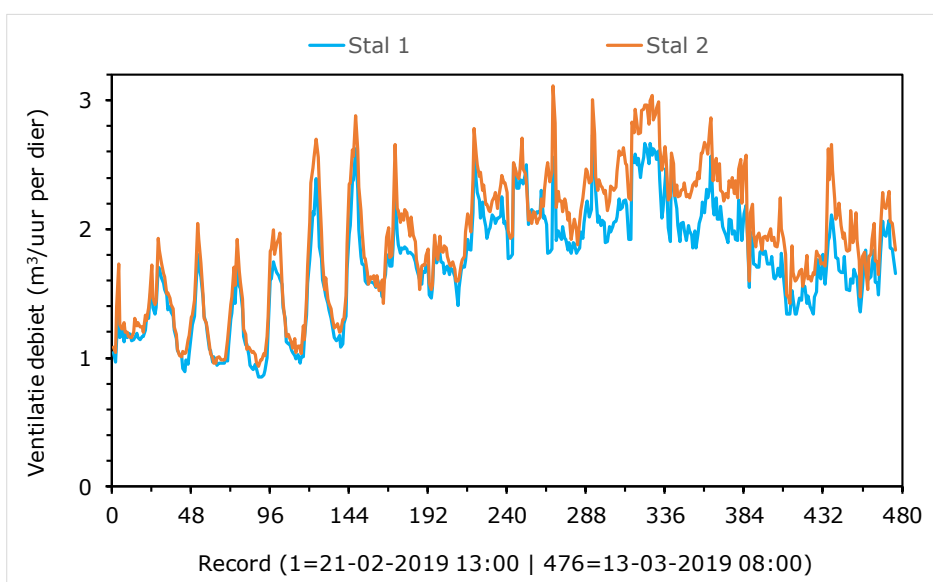
CO₂-concentraties t.b.v. berekening van het ventilatiedebiet



Figuur C.2 Uurwaarden van de concentratie van koolstofdioxide (CO₂) in Stal 1 en Stal 2. Aan het einde van de meetcampagne waren voor twee dagen geen data beschikbaar. De concentraties op deze dagen zijn genomen van de laatste meetdag (extrapolatie).

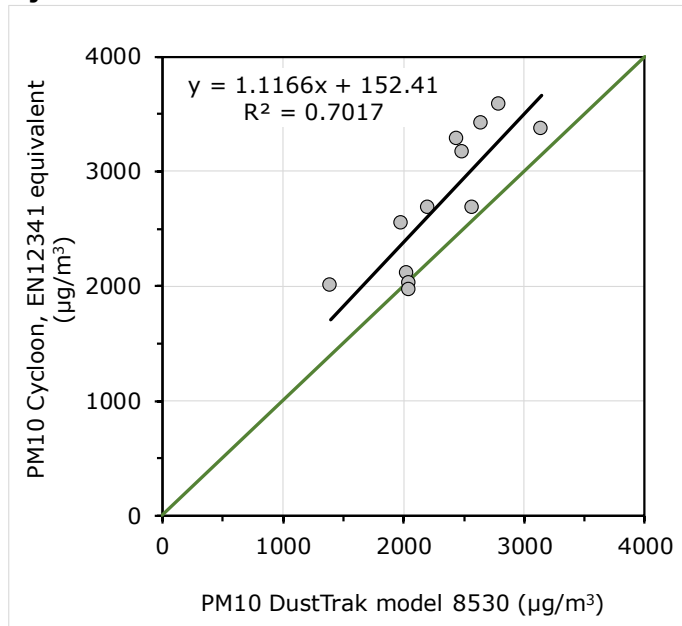


Figuur C.3 Relatie tussen het 24-uurgemiddelde ventilatiedebiet zoals berekend op basis van de CO₂-balansmethode en het relatieve ventilatieniveau zoals gelogd door de stalcomputer op het bedrijf. Deze relaties zijn gebruikt om de uurgemiddelde relatieve ventilatieniveaus van de stalcomputer om te rekenen naar absolute ventilatiedebieten in m³/uur per dier, en aan de hand van het aantal aanwezige dieren in de stal, naar m³/uur voor de stal als geheel.

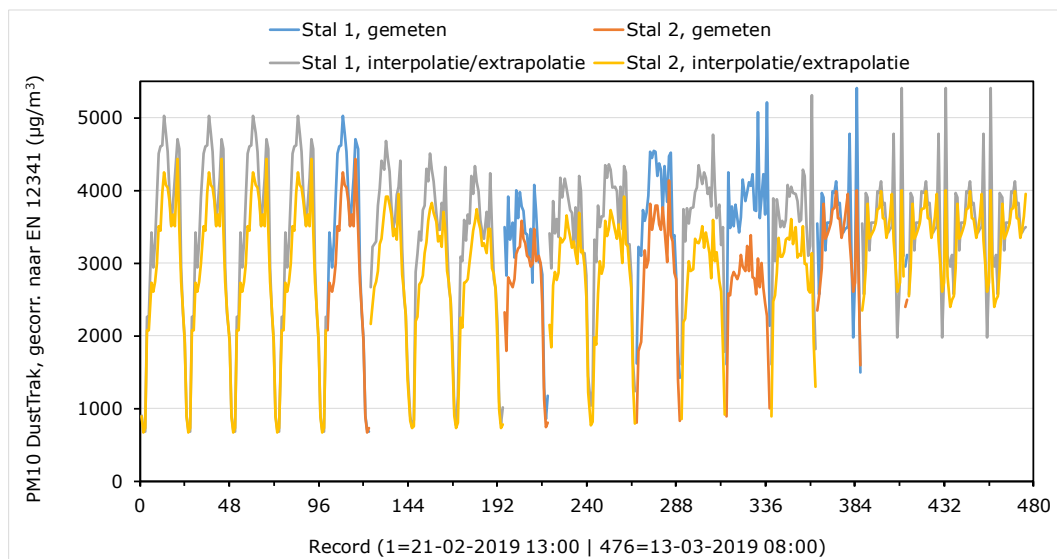


Figuur C.4 Uurwaarden van het ventilatiedebiet in stal 1 en stal 2.

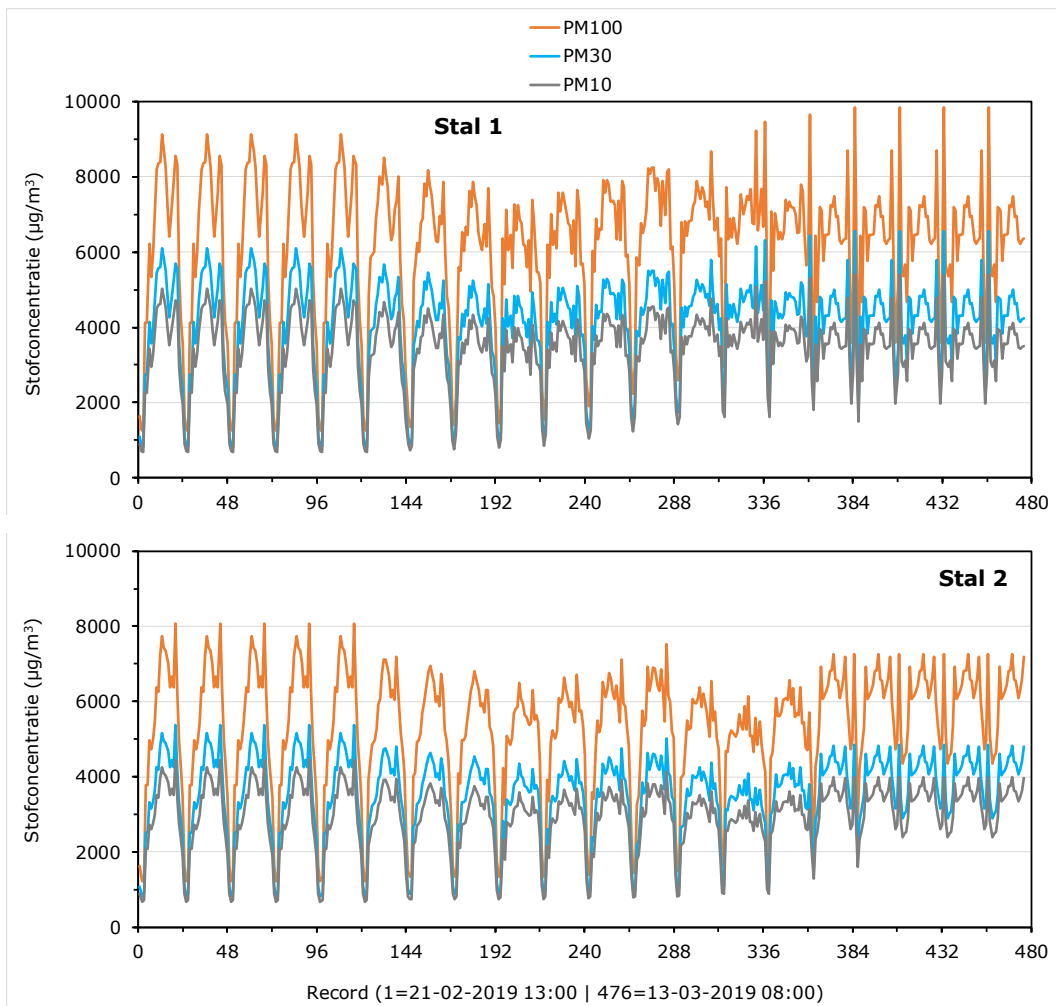
Fijnstofconcentraties



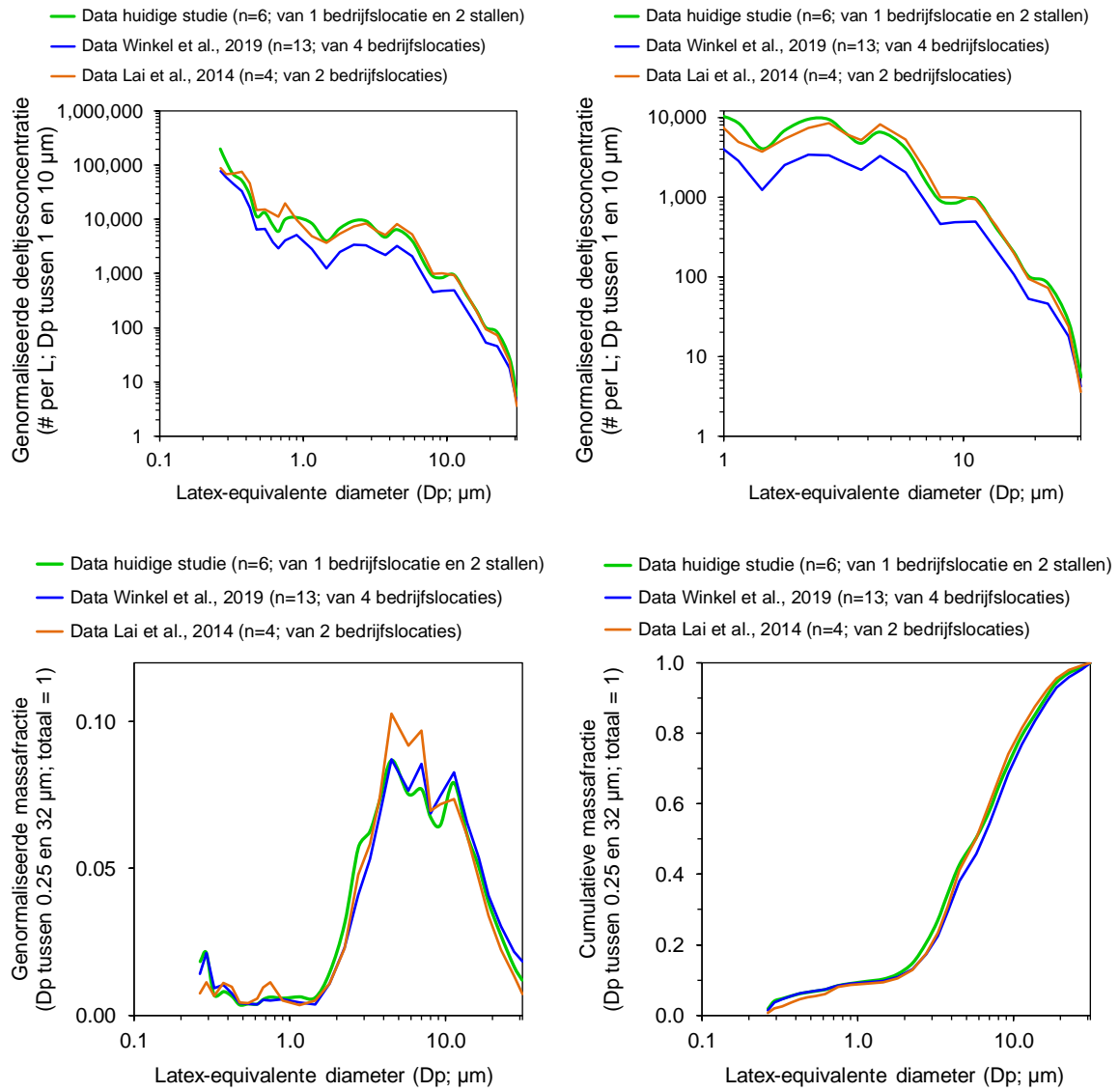
Figuur C.5 Relatie tussen de PM_{10} concentratie zoals gemeten met de gravimetrische methode, equivalent aan de EN 12341 referentie sampler en het gemiddelde van de continu gemeten PM_{10} concentratie met de DustTrak model 8530 voor dezelfde tijdperiode als de samplingperiode van de voornoemde methode. Deze relatie is gebruikt om de uurgemiddelde PM_{10} concentraties om te rekenen naar een absoluut accurate concentratie.



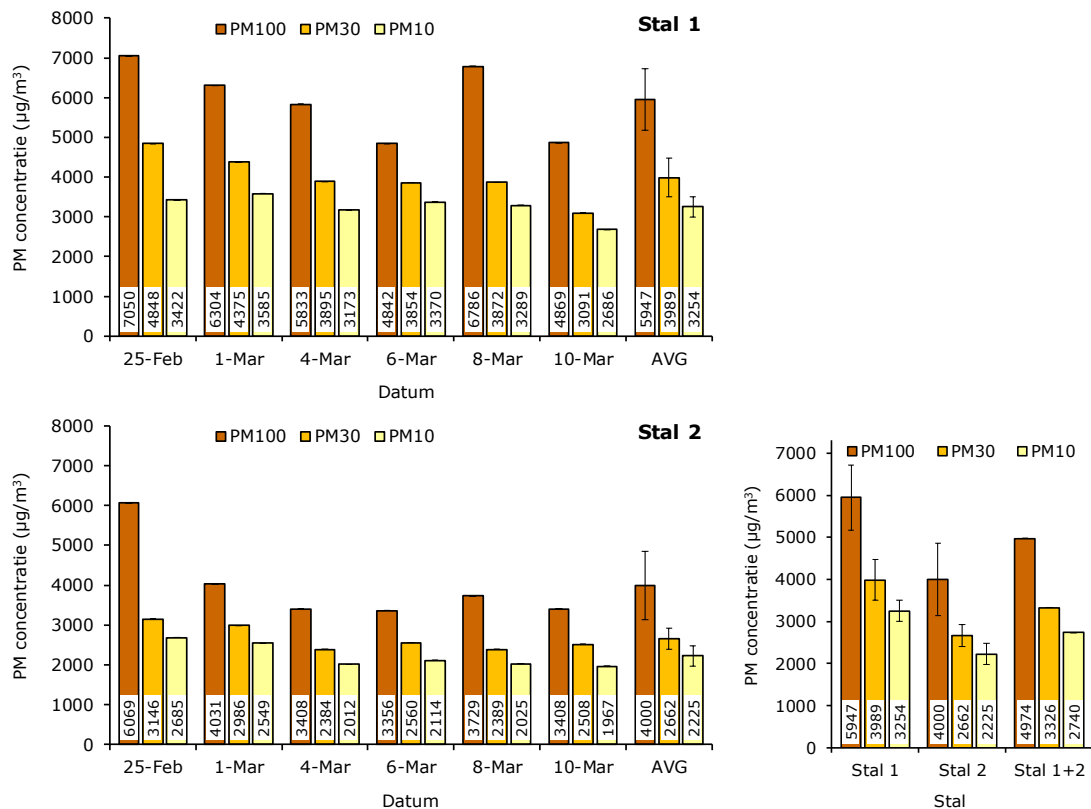
Figuur C.6 Uurwaarden van de PM_{10} concentratie in Stal 1 en Stal 2. Voor vijf dagen waren meetgegevens uit de DustTraks voorhanden. Voor de overige dagen zijn de uurwaarden verkregen via interpolatie en extrapolatie.



Figuur C.7 Uurwaarden in de concentraties van PM_{100} , PM_{30} en PM_{10} in stal 1 en stal 2. De uurwaarden van PM_{100} en PM_{30} zijn verkregen door de PM_{10} concentratie te vermenigvuldigen met een PM_{100}/PM_{10} ratio van 1,82 en een PM_{30}/PM_{10} ratio van 1,21 zoals bepaald met de gravimetrische methoden.

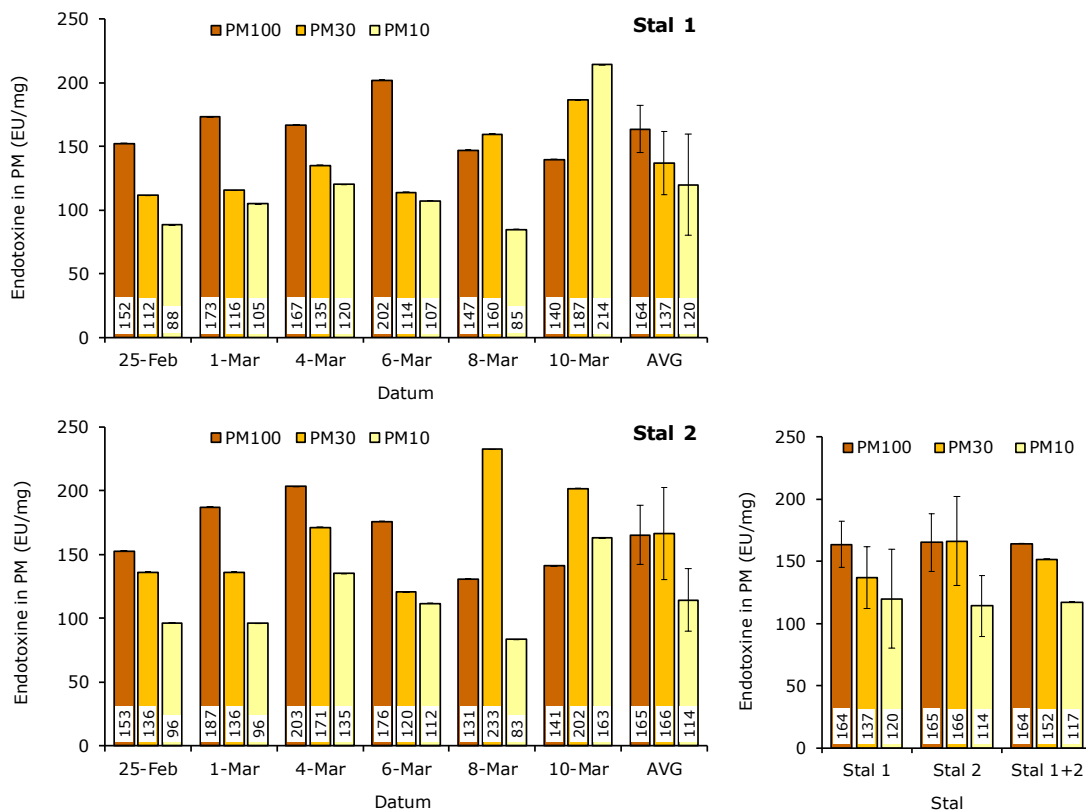


Figuur C.8 Deeltjesgrootteverdeling zoals gemeten met de Portable Aerosol Spectrometer, model 1.109 (stal 1 en stal 2 gepoold).



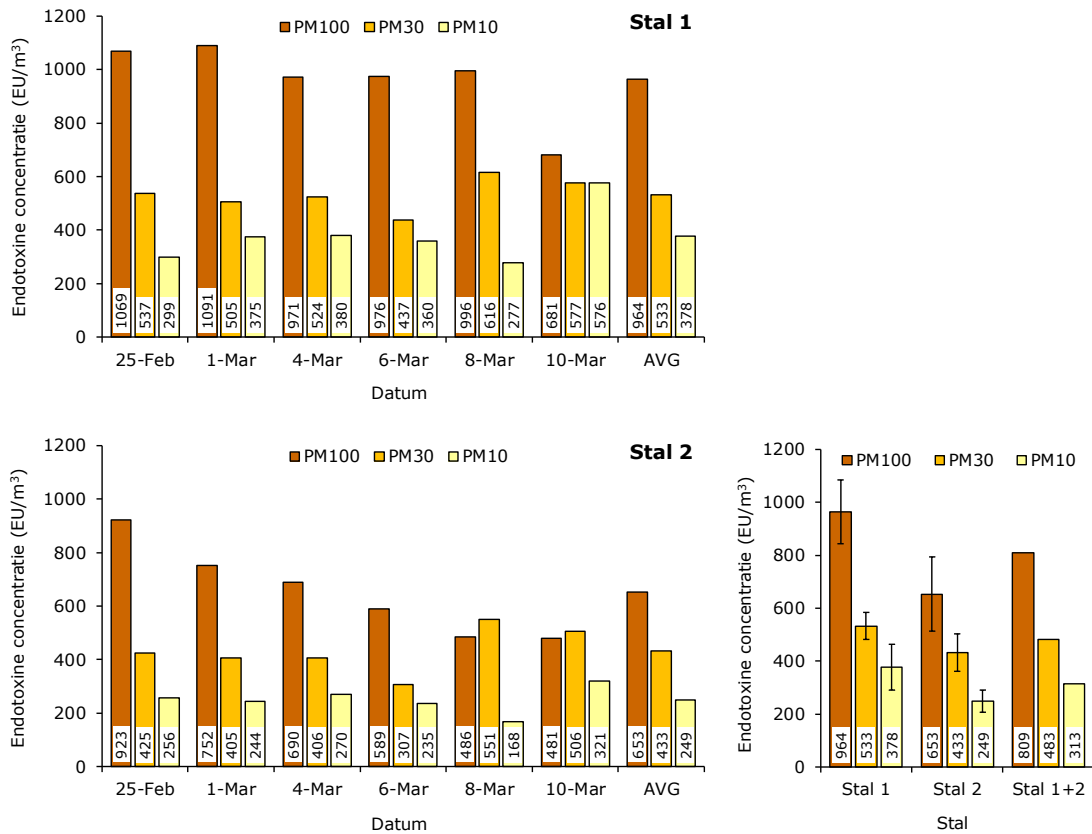
Figuur C.9 Concentraties van PM_{100} , PM_{30} en PM_{10} zoals gemeten met de gravimetrische methoden op zes verschillende dagen tijdens de meetcampagne. De data worden weergegeven voor Stal 1 (boven), voor Stal 2 (linksonder), en voor beide stallen samen (rechtsonder).

Endotoxinegehalten in het stalstof (EU/mg)



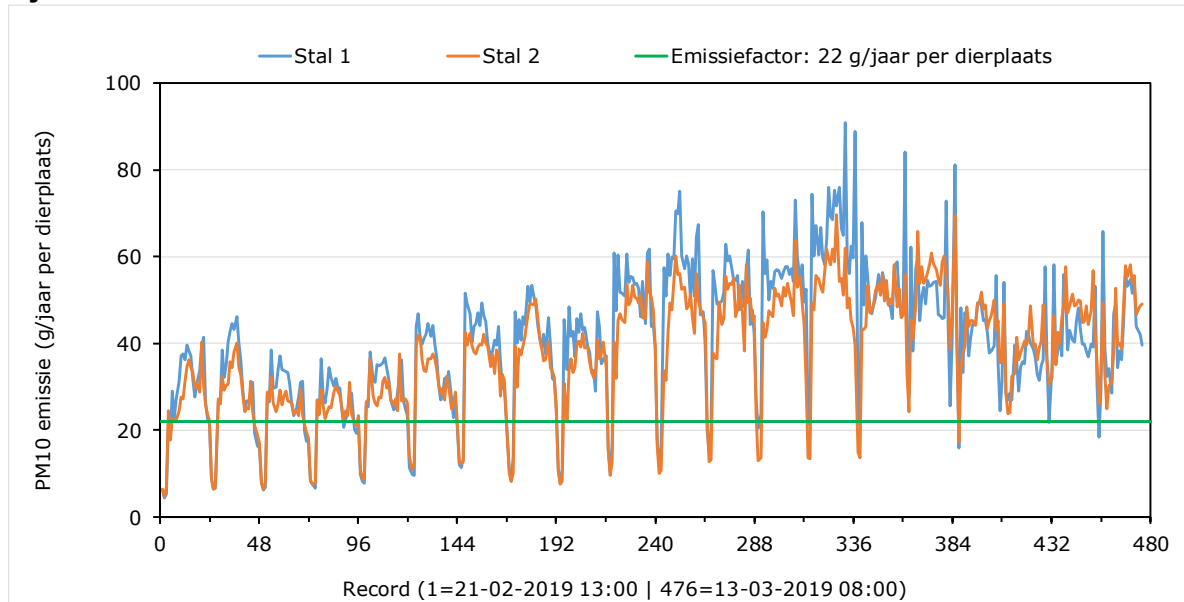
Figuur C.10 Idem als vorige figuur, maar hier voor het endotoxinegehalte in het stof

Endotoxineconcentraties in de stallucht (EU/m³)



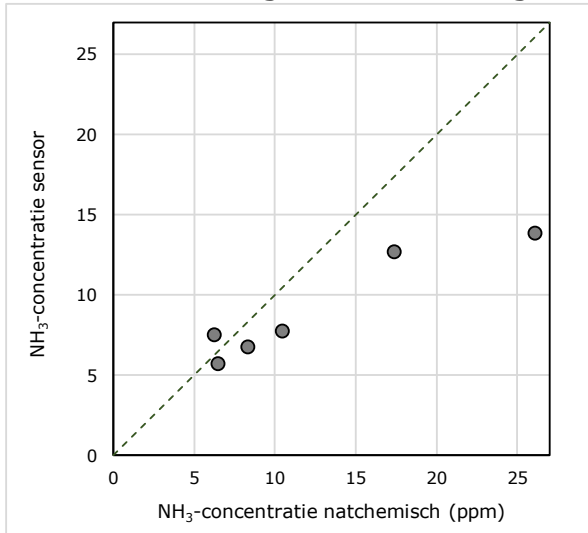
Figuur C.11 Idem als vorige figuur, maar hier voor de endotoxineconcentraties in de stallucht.

Fijnstofemissies



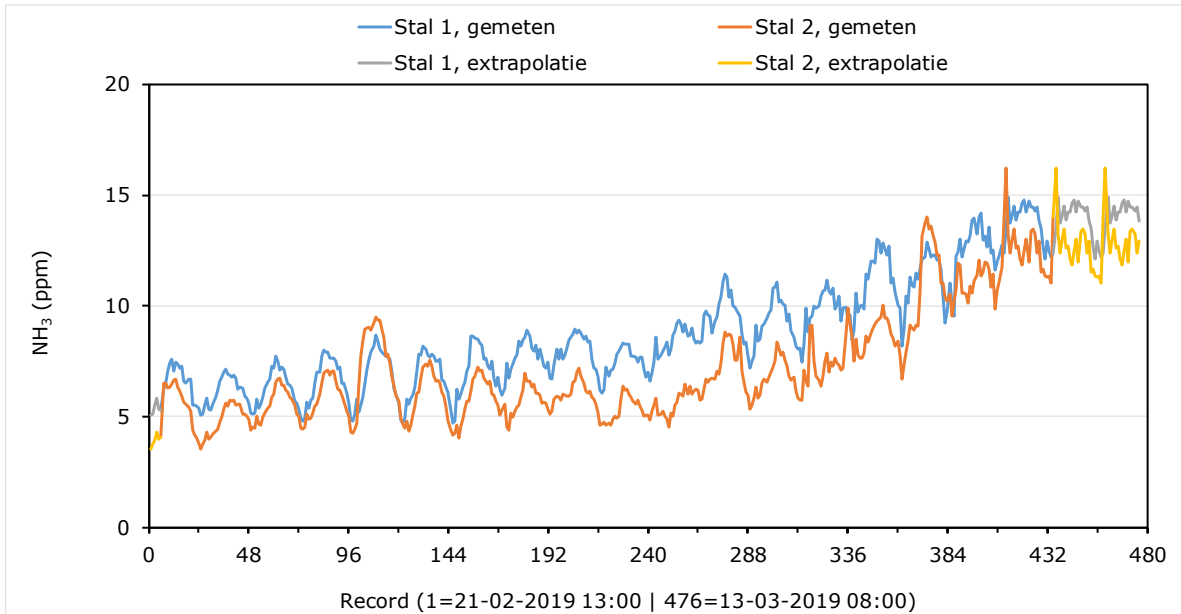
Figuur C.12 Uurwaarden van de emissie van PM₁₀ uit Stal 1 en Stal 2 (uitgedrukt in g/jaar per dierplaats) en vergeleken met de emissiefactor van het huisvestingssysteem voor PM₁₀ van 22 g/jaar per dierplaats. N.B. De getoonde periode betreft de laatste drie weken van de groeicyclus van in totaal 56 dagen. De getoonde periode is voorafgegaan door een periode van aanzienlijk lagere emissies.

Verificatie stalmetingen ammoniak: Dräger sensoren versus natchemische methode

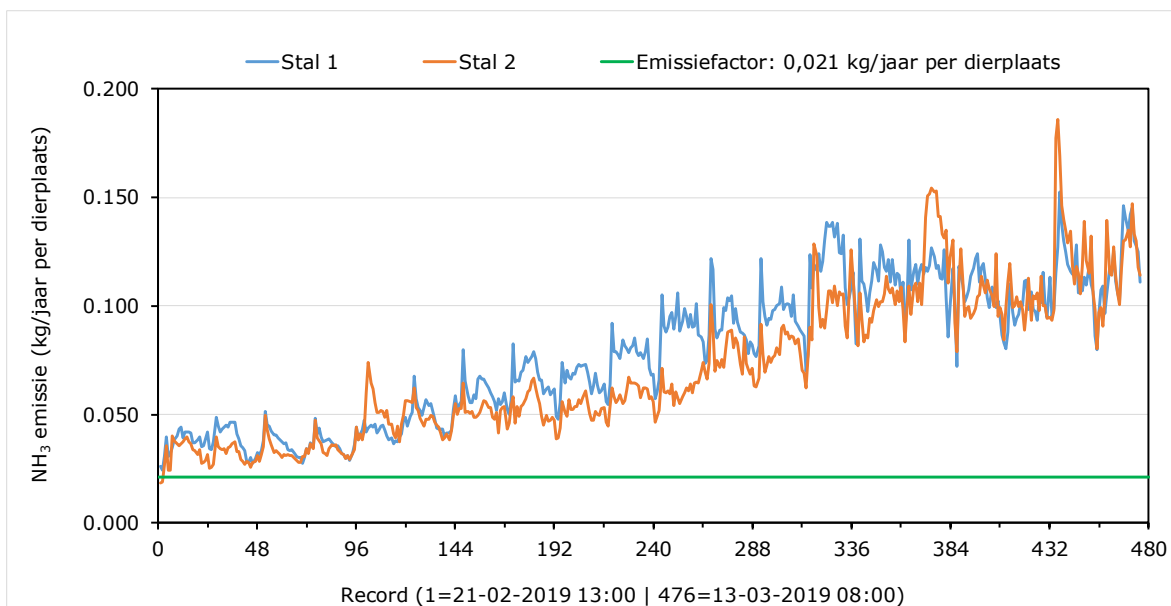


Figuur C.13 Tijdens drie dagen in de meetcampagne zijn de stalmetingen van ammoniak met de Dräger sensoren uitgebreid met simultane en "side-by-side" metingen met de natchemische methode ($n=3$ dagen \times 2 stallen = 6 datapunten). Deze figuur toont de relatie tussen beide meetmethoden.

Ammoniakconcentraties en emissies



Figuur C.14 Uurwaarden van de concentratie van ammoniak in Stal 1 en Stal 2 zoals gemeten met de Dräger sensoren.

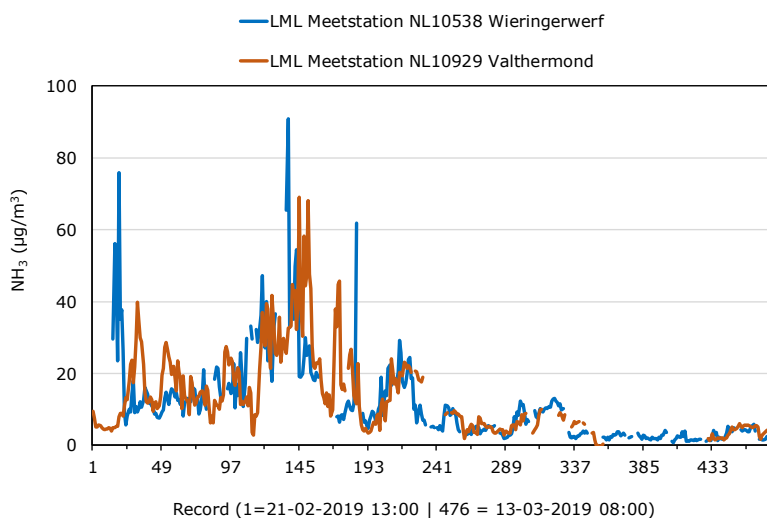
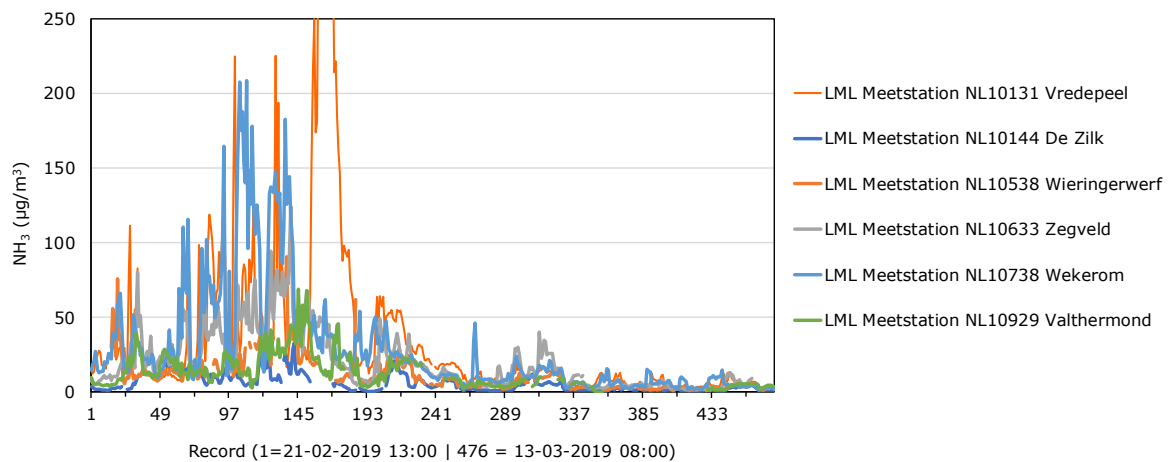


Figuur C.15 Uurwaarden van de emissie van ammoniak uit Stal 1 en Stal 2 (uitgedrukt in kg/jaar per dierplaats) en vergeleken met de emissiefactor van het huisvestingssysteem voor NH_3 van 0,021 kg/jaar per dierplaats. N.B. De getoonde periode betreft de laatste drie weken van de groeicyclus van in totaal 56 dagen. De getoonde periode is voorafgegaan door een periode van aanzienlijk lagere emissies.

Bijlage D: ammoniakconcentraties LML tijdens meetcampagne

Hieronder zijn de concentraties van ammoniak als tijdsserie weergegeven zoals die gemeten zijn door de meetstations van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit gedurende de meetcampagne uit dit onderzoek. In de bovenste figuur worden de concentraties weergegeven van alle zes meetstations in Nederland. In de onderste figuur alleen voor de twee meetstations die het dichtst bij de meetlocatie in Noord-Nederland lagen.

Bedacht moet worden dat de concentraties in onderstaande figuren gemeten zijn met de mini-DOAS met een tijdsresolutie van een uur. Dit betekent dat het niveau van deze concentraties niet kan worden vergeleken met die gemeten met de ammoniak adsorptiebuisjes in het onderhavige onderzoek; deze laatste hadden een middelingstijd van twee tot drie dagen. Door die langere middelingstijd zijn kortdurende pieken (uren) niet zichtbaar in de resultaten van de adsorptiebuisjes, ze geven slechts een kleinere of grotere verhoging van het algemene niveau over die dagen.



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
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.

