



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Bijlage 11 **OPS Modellerings**

Bijlage bij RIVM Rapport 2017-0062
Marina Sterk | Arno Swart | Ferd Sauter

Contact: Arno Swart, RIVM

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Inhoudsopgave

1	Het atmosferisch verspreidingsmodel OPS — 3
1.1	Introductie OPS — 3
1.1.1	Emissie VGO-boerderijen — 3
1.1.1.1	Bronsterkte — 3
1.1.1.2	Overige bronkenmerken — 4
1.1.2	Processen — 5
1.2	Meteorologie — 6
1.2.1	Meteorologie in het OPS model — 6
1.2.2	Meteorologische observaties bij boerderijmetingen VGO — 7
2	Validatie verspreidingsmodellering — 9
3	Modellering op regionale schaal — 10
3.1	Emissies — 10
3.2	Deeltjesgrootte — 12
3.3	Verspreidingsmodellering met OPS-ST — 12
3.4	Discussie — 13
4	Bibliografie — 14

1 Het atmosferisch verspreidingsmodel OPS

1.1 Introductie OPS

Het OPS (Operationele Prioritaire Stoffen) model is een transport- en depositiemodel waarbij relaties tussen individuele bronnen en receptoren (locaties waarop de concentratie uitgerekend wordt) beschreven worden door Gaussische pluimen (Sauter et al., 2016). Enerzijds is het doel van OPS om de verspreiding van verontreinigende stoffen in de lucht in Nederland te berekenen (bijvoorbeeld fijnstof, en verzurende stoffen zoals zwaveldioxide, stikstofoxiden en ammoniak). Een ander voornaam doel is het berekenen van de depositie in Nederland, oftewel hoeveel van de stoffen op het aardoppervlak terecht komt. Voor elke afzonderlijke bron wordt de concentratie berekend, als resultaat van dispersie en transport, waarbij rekening wordt gehouden met chemische omzettingen en droge en natte depositie. Voor een bepaalde locatie worden de bijdragen van al deze afzonderlijke bronnen opgeteld om tot de totale concentratie op die locatie te komen. Voor dit onderzoek is het OPS kortetermijnmodel (OPS-ST) gebruikt, versie 11.0.8. In tegenstelling tot het langetermijnmodel, waarbij lange-termijn gemiddelde (bijv. jaarlijks) meteorologische data wordt gebruikt, kan het kortetermijnmodel uurlijkse berekeningen uitvoeren. Dit maakt het OPS-ST model heel geschikt om modeluitkomsten te vergelijken met kortdurende meetcampagnes zoals hier het geval is.

1.1.1 Emissie VGO-boerderijen

1.1.1.1 Bronsterkte

De in het OPS verspreidingsmodel berekende fijnstofdeeltjes dienen als indicator voor de concentraties micro-organismen en endotoxinen (zie ook bijlage 09).

Aangezien het OPS model voor elke bron apart het aandeel van die bron op de concentratie in de lucht berekent, moet per bron de emissiesterkte bekend zijn. Ook kan een gebiedsgemiddelde emissiesterkte aangeleverd worden. In het geval van de boerderijmetingen zijn de stofconcentraties in de stal gemeten (C_{stof} in $mg\ m^{-3}$). Een boerderij kan uit meerdere stallen bestaan, de specifieke stal waarin de metingen zijn uitgevoerd zullen wij aanduiden als 'de meetstal'. Bij de meetstal is met behulp van de CO_2 massabalansmethode (Aarnink et al., 2012; Ogink et al., 2013; Pedersen et al., 2008; CIGR, 2002) ook het debiet bepaald, oftewel de luchtstroom die per tijdseenheid (F in $m^3\ h^{-1}$) de boerderij verlaat. De emissiesterkte van de meetstal is dan $Q = 10^{-3} C_{stof} * \frac{F}{3600}$. (Q in $g\ s^{-1}$)

De stofconcentraties worden gedurende 5 uur tussen 11 en 16 uur gemeten. De debieten worden bepaald gedurende dezelfde tijdsperiode, en gedurende een uur beginnend om 11, 13 en 15u. Zodoende kunnen per meetdag per type stofmeting (PM_{10} of PM_{100}) vier emissiesterktes worden berekend, waarbij wel steeds dezelfde concentraties stof worden gebruikt, maar vier variërende debieten. De modelberekeningen met emissiesterkte representatief voor de periode 11-16u zullen worden gebruikt voor de vergelijking met stof- en endotoxineconcentraties omdat deze alleen gedurende deze 5 uur zijn gemeten. De modelberekeningen met emissiesterkte representatief voor de

afzonderlijke uren zullen worden gebruikt voor de vergelijking met de levende indicator micro-organismen (uitgedrukt in CFU, colony forming units), omdat deze slechts gedurende 10 minuten gemeten zijn. Het dode en levende materiaal (DNA als indicator voor het totaal aantal micro-organismen, bepaald met de PCR techniek) zijn bepaald gedurende de 5 uur en gedurende de 10 minuten. Zodoende worden de modelberekeningen met emissiesterke representatief voor al deze perioden gebruikt voor de validatie. We gaan ervan uit dat deze 10-minuten metingen representatief zijn voor het hele uur. De onzekerheid en variatie in de 10-minutengemiddelde meting is wel groter dan bij uurgemiddelde concentraties.

Overigens is de totale emissiesterke van de stal bij meerdere emissiepunten evenredig verdeeld over deze afzonderlijke emissiepunten. Verder kan het voorkomen dat bij een boerenbedrijf naast de meetstal nog een of enkele andere stallen staan. Omdat de emissie van deze stallen ook van invloed is op de gemeten concentraties, moeten ook de emissies van deze stallen meegenomen worden. Aangezien in deze naastgelegen stallen geen directe metingen zijn uitgevoerd, moeten enkele aannames gemaakt worden om de emissiesterke te bepalen. We gaan ervanuit dat de stofconcentratie gelijk is aan de concentratie in de meetstal. Wel wordt het debiet gecorrigeerd voor het aantal dieren. Daarnaast wordt een correctie gemaakt voor het type meetstal. Dit gebeurt op basis van de verhouding in emissiefactoren voor fijnstof zoals gepubliceerd door het ministerie van Infrastructuur en Milieu¹. Hiervoor wordt wel aangenomen dat voor PM₁₀₀ eenzelfde verhouding in emissiesterkes geldt als voor PM₁₀. Omdat tijdens de pilotfase de stofbelasting van het PM₁₀-meetinstrument erg hoog bleek en er zodoende overbelasting plaatsgevonden zou kunnen hebben, worden de resultaten behaald met dit instrument als minder betrouwbaar gezien. Daarom is voor de vervolgmetingen gekozen om alleen PM₁₀₀ te meten met een ander instrument. Daarom is ook voor de modellering de emissiesterke alleen bepaald op basis van de PM₁₀₀ concentraties. Uit de deeltjesgrootteverdelingscurve (Bijlage 09) bleek dat de massafractie tussen PM₅₀ en PM₁₀₀ verwaarloosbaar klein is. Zodoende is geen correctie gemaakt in emissiesterke van PM₁₀₀ naar de PM₅₀ die wordt gemodelleerd met OPS.

1.1.1.2 Overige bronkenmerken

Naast de bronsterke, heeft het OPS model ook informatie over de locatie en hoogte van de bron nodig. Er wordt verondersteld dat er geen pluimstijging optreedt ten gevolge van de warmte-inhoud van de pluim die het emissiepunt verlaat. Als de stallucht veel warmer is dan de buitenlucht, kan de pluim hoger opstijgen en anders verspreid worden. Bij de deelnemende pluimveehouderijen is de streef temperatuur voor leghennen 19 – 20oC en voor vleeskuikens 18 – 34oC (afhankelijk van de leeftijd). Voor de vleesvarkens- en zeugenhouders is geen streef temperatuur bekend, maar volgens Klimaatplatform

¹ Bron: Ministerie van IenM,

<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/publicaties/2016/03/15/emissiefactoren-fijn-stof-voor-veehouderij-2016>. Let op: dit is een oude versie. Op het moment van schrijven staat alleen de versie van 2017 online: <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/publicaties/2017/03/15/emissiefactoren-fijn-stof-voor-veehouderij-2017>.

Varkenshouderij (Klimaatplatform Varkenshouderij, 2014) , is de begintemperatuur van de ventilatie tussen de 20 en 26oC, met hogere temperaturen voor de biggen. We verwachten dus dat dit effect bij de boerderijmetingen niet heel groot zal zijn, en dat dit met name een rol speelt bij industriële bronnen.

De stalemissies worden gemodelleerd als puntbronnen en de emissiepunten worden afzonderlijk meegenomen.

In de modellering varieert de emissie niet met het tijdstip van de dag, en ook niet met de groeicyclus van de dieren. Noch wordt er rekening gehouden met het legen van stallen waarna de stal ook enige tijd buiten gebruik is. Wat betreft deze laatste 2 aannames (groeicyclus en productiecycclus van dieren): deze zijn niet van belang voor de verspreidingsmodellering van de situatie zoals gemeten rondom de boerderijen, omdat slechts op een enkele dag gemeten is gedurende een beperkt aantal uren. Wel kan dit van belang zijn voor extrapolatie van de modellering naar langere tijdsduur en de modellering op regionale schaal waar emissies van stallen met een bepaalde diersoort binnen het VGO-gebied voor een jaar worden doorberekend (zie ook hoofdstuk 3 in deze bijlage). Hoewel hier jaargemiddelde emissiesterktes worden toegepast waar incidentele leegstand wel in is meegenomen, is er dus geen variatie in emissiesterkte in de tijd.

1.1.2 *Processen*

Het OPS model is een combinatie van een Gaussisch pluimmodel en een Lagrangiaans transport model (waarbij de pluim gevolgd wordt door de tijd heen, in dit geval door middel van trajectoriën²). In het model worden verschillende processen meegenomen.

Allereerst is de mate van dispersie (diffuse verspreiding) van belang. Deze bepaalt hoe gemakkelijk een pluim verdund wordt. Dit is afhankelijk van bijvoorbeeld de turbulentie in de atmosfeer, maar ook de hoogte van de atmosferische menglaag.

Ten tweede speelt atmosferisch transport een rol. Vooral de windsnelheid en windrichting zijn bepalend voor de verspreiding door de atmosfeer. Voor elke bron wordt een trajectorie berekend om het veranderende pad van een pluim (bijvoorbeeld door verschillende windvelden in de tijd) te volgen. Deze trajectorie wordt tot 96 uur terug bijgehouden en uurlijks geupdated met veranderende meteorologie, zodat kan worden bekeken of een bepaalde bron een bijdrage levert aan de concentratie op een bepaalde receptor, ook als de pluim een reisafstand langer dan een uur van de receptor vandaan ligt. Voor verdere afstanden dan 96 uur wordt verondersteld dat de bijdrage aan de receptor verwaarloosbaar is.

Depositie is een belangrijk verwijderingsproces van deeltjes uit de atmosfeer. Hierbij slaan deeltjes neer op een oppervlak, zoals bijvoorbeeld de bodem, een wateroppervlak of vegetatie. Dit kan plaatsvinden in de vorm van droge depositie, waarbij stoffen door turbulentie en wind naar het oppervlak getransporteerd worden of door de zwaartekracht naar beneden vallen, en in de vorm van natte depositie wanneer stoffen ingevangen worden in waterdruppeltjes en uitregen. Een ander verwijderingsproces is chemische omzetting,

² Een trajectorie is in dit geval het pad dat de pluim volgt door de ruimte en als functie van de tijd. OPS-ST houdt gedurende 96 uur bij hoe een pluim zich ontwikkelt, waarbij elk uur een update gemaakt wordt t.g.v. de veranderende meteorologie.

maar dat is niet relevant voor de modellering van stofdeeltjes (die als proxy dienen voor de endotoxinen- en micro-organismenverspreiding). Voor de technische beschrijvingen betreffende de bovengenoemde processen, verwijzen we naar de modelbeschrijving van het OPS langetermijnmodel (Sauter et al., 2016), en naar de beschrijving van het OPS kortetermijnmodel (Sauter et al., in preparation). Een proces dat in het kader van het VGO project expliciet voor de verspreidingsmodellering van micro-organismen is ingebouwd in het OPS kortetermijnmodel, is inactivatie, of afsterving. Dit proces wordt beïnvloed door omgevingsfactoren en meteorologische omstandigheden zoals reeds beschreven in Bijlage 10.

Om de concentraties met inbegrip van de inactivatie (C_{incl_inact}) te berekenen, wordt dit proces gecombineerd met de Gaussische pluimvergelijking als een eerste-ordeproces. Een constante inactivatiesnelheid λ [sec^{-1}] geeft aanleiding tot een exponentiële afname als functie van de afstand x , en windsnelheid u :

$$C_{incl_inact} = C \cdot \exp\left(-\lambda \frac{x}{u}\right),$$

waarbij C de concentratie is na dispersie en transport (Van Leuken et al., 2016).

Uit de literatuurstudie en volgende regressie-analyse, werd de volgende functie voor inactivatiesnelheid verkregen (zie ook Figuur 6.1 in het hoofdrapport van de VGO modellering, en in bijlage 10):

$$\lambda = \mu/60; \quad \mu = 10^{-1.81-0.73\text{grampos}+0.03T}$$

Hier is μ [min^{-1}] een functie van temperatuur T , en gramkleuring waarbij '-0.73grampos' alleen wordt meegenomen voor gram-positieve bacteriën. Deze term wordt nul voor gram-negatieve bacteriën.

1.2 Meteorologie

1.2.1 Meteorologie in het OPS model

Aangezien het OPS kortetermijnmodel uurlijkse concentraties en deposities kan berekenen, moeten de meteorologische gegevens ook voor ieder uur bekend zijn. Het OPS model maakt gebruik van primaire meteorologische variabelen gemeten op 19 KNMI meetstations. De variabelen gemeten op deze stations worden ruimtelijk geïnterpoleerd op een $10 \times 10 \text{ km}^2$ grid over Nederland met een weegfactor per meetstation die afhangt van de afstand tot de gridcel. Vervolgens worden de variabelen gemiddeld over een vooral gedefinieerd gebied. Hiervoor is Nederland opgedeeld in 6 regio's, waarvan één wordt gekozen voor het gebruik binnen het OPS kortetermijn model, afhankelijk van de locatie waarop gemodelleerd wordt.

De meteorologische data zoals windsnelheid, windrichting, globale straling (totale hoeveelheid zonnestraling), temperatuur, relatieve vochtigheid en neerslagduur worden uurlijks aangeleverd. De neerslagintensiteit wordt alleen als daggemiddelden ingelezen. Vervolgens worden deze primaire meteorologische data gebruikt om de secundaire meteorologische variabelen uit te rekenen zoals de Obukhov lengte, de frictiesnelheid en de voelbare warmtestroom. Deze worden gebruikt om het verticale windprofiel en de grenslaaghoogte te bepalen.

De grenslaag is de laag die grenst aan het aardoppervlak en die direct beïnvloed wordt door de uitwisseling van o.a. warmte, waterdamp en impuls vanaf het aardoppervlak. Overdag is de grenslaag doorgaans dikker dan 's nachts, wat mede bepalend is voor het mengvolume waarin stoffen doorgemend kunnen worden. Ook wordt met deze gegevens de mate van turbulentie berekend, want ook effect heeft op de verspreiding van stoffen.

Meer informatie over de meteorologie en het OPS model is te vinden in Sauter et al. (2016).

1.2.2 *Meteorologische observaties bij boerderijmetingen VGO*

Naast dat bij de afzonderlijke boerderijen concentraties van stof, endotoxinen en (indicator) micro-organismen zijn gemeten, zijn er ook lokale metingen gedaan van windsnelheid, windrichting, temperatuur en relatieve vochtigheid. Deze metingen vonden plaats op 50m benedenwinds van de stal op 1.5 m hoogte. Omdat deze metingen representatiever zijn voor het gebied direct rondom de boerderijen ten opzichte van de gebiedsgemiddelde meteorologie zoals eerder beschreven in paragraaf 1.2, gebruiken we deze meteorologie bij de modellering rondom de boerderijen waar gemeten is. Hiervoor worden de lokale variabelen binnen het meteorologische bestand dat wordt ingelezen in OPS overschreven met de gemeten waarden, alleen voor die uren waarop gemeten is.

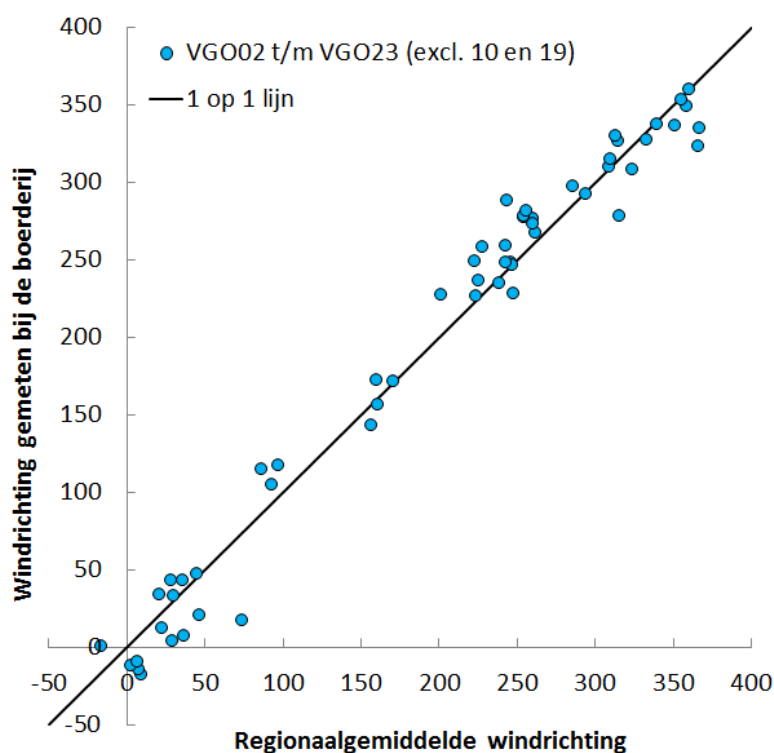
Voor temperatuur en relatieve vochtigheid is de referentiehoogte in het meteorologische bestand dat wordt ingelezen in OPS ook 1.5 m hoogte; hier zijn dus geen wijzigingen nodig. De referentiehoogte waarop de windvelden worden ingelezen echter, is 10m. Bovendien behoort de windsnelheid die is gegeven bij een referentie ruwheidslengte³ van 0.03m (typisch voor grasland). Zodoende wordt de gemeten windsnelheid gecorrigeerd van de 1.5m meethoogte en de lokale ruwheidslengte (afhankelijk van het landgebruik in de omgeving van de boerderij), naar de voor OPS noodzakelijke referentiehoogte en referentieruwheidslengte volgens Wieringa en Rijkoort (1983). Overigens wordt bij de modellering wel weer een terugcorrectie gemaakt voor de hoogte van de pluim en de ruwheidslengte passend bij het landgebruik op de locatie. Dit is van belang omdat de ruwheidslengte invloed heeft op het windprofiel in de hoogte en ook de windsnelheid logaritmisch toeneemt met de hoogte.

De windrichting kan ook veranderen met de hoogte. Doordat het aardoppervlak ruw is, voelt de lucht wrijving. Hierdoor is er een verandering in het krachterevenwicht ten opzichte van grotere hoogtes waar de lucht de wrijving minder ondervindt en gaat de wind krimpen (verandering van windrichting tegen de klok in) dichter naar het oppervlak. Hoewel qua windsnelheid de grootste veranderingen nabij het oppervlak zijn, vindt het grootste deel van de krimpings plaats tussen zo'n 60 – 1000m (Wieringa en Rijkoort, 1983). Om deze reden verwachten we slechts zeer kleine veranderingen tussen de observatiehoogte van 1.5m en de referentiehoogte van 10 en worden de gemeten windrichtingswaarden niet aangepast.

³ De ruwheidslengte geeft een maat van de ruwheid van het terrein. Zo heeft bos of stedelijk gebied een hogere ruwheidslengte dan gladde oppervlaktes zoals grasland of sneeuw.

Figuur 1 geeft de vergelijking tussen de regionaalgemiddelde windrichting gebaseerd op de gegevens van de KNMI-stations en de windrichting zoals gemeten 50m benedenwinds van de stal⁴. VGO10 en VGO19 zijn niet meegenomen in dit overzicht, omdat dit alleen stalmetingen waren.

Deze figuur laat zien dat er over het algemeen goede overeenstemming is tussen de regionaalgemiddelde en lokale windrichting, maar dat ook verschillen tot enkele tientallen graden kunnen voorkomen. Omdat de windrichting medebepalend is voor de gemodelleerde concentratie, is het zeker voor deze lokale schaal belangrijk zo nauwkeurig mogelijk de meteorologie voor te schrijven in het model. We zullen daarom de in de VGO studie gemeten windsnelheden gebruiken.



Figuur 1. Vergelijking tussen de regionaalgemiddelde windrichting en de windrichting zoals gemeten bij de boerderijen die zijn meegenomen in de validatie.

⁴ Er is hier wel gecorrigeerd voor de windrichting wanneer één van de twee waarden aan de 2 kanten rondom het noorden liggen. Bijvoorbeeld wanneer de waarde op de x-as 355 graden geeft en op de y-as 5 graden, laat dit grote verschillen zien t.o.v. de één op één lijn, terwijl er eigenlijk slechts 10 graden verschil is. Daarom laat de figuur ook negatieve waarden en waarden boven 360o zien, omdat bij één van de twee waarden ofwel 360 graden is opgeteld of afgetrokken.

2 Validatie verspreidingsmodellering

Validatie van het model door vergelijking met de metingen, zoals gerapporteerd in "Veehouderij en Gezondheid Omwonenden(aanvullende studies)", bestaat uit een aantal stappen. De procedure die hieronder wordt uiteengezet is gevolgd voor iedere boerderij waar buitenmetingen zijn verricht.

Ten eerste is bekend dat binnen de boerderij een snelle inactivatie van micro-organismen plaatsvindt (Hagenaars, 2017). Deze snelle inactivatie is niet gemodelleerd in het inactivatiemodel wat is ingebouwd in OPS, waar alleen de langzame inactivatie in de lucht is gemodelleerd. Om deze snelle inactivatie toch te kunnen modelleren worden de metingen van micro-organismen in de stal gebruikt. We bepalen de fractie gemeten micro-organismen, en passen dit toe op het ge-emiteerde stof om zo een schatting te verkrijgen van de fractie levende organismen bij verlaten van de stal. Hierna wordt het inactivatiemodel tijdens transport door de lucht toegepast.

Ten tweede hebben we rekening te houden met de achtergrondconcentraties. OPS berekent slechts de concentraties ten gevolge van een enkele bron: de boerderij voor welke we willen valideren. De achtergrondconcentratie is echter ook een gevolg van emissies van nabijgelegen boerderijen. Voor een validatie van enkel de emissies uit de boerderij welke gemodelleerd wordt, trekken we de gemeten achtergrondconcentratie af van de gemeten concentraties op de verschillende afstanden van de boerderij.

Als laatste, wanneer er meerdere meetmomenten per dag waren, worden deze gemiddeld.

De verdere berekening is eenvoudig. Uit de deeltjesgrootteverdeling (Appendix 9) wordt het aantal organismen per microgram stof bepaald, en vermenigvuldigd met de gemodelleerde hoeveelheid stof per vierkante meter. Dit levert organismen per kubieke meter, welke vergeleken kunnen worden met de metingen (na bovenstaande correcties te hebben toegepast).

3 Modelling op regionale schaal

Bij de verspreidingsmodellering zoals toegelicht in Hoofdstuk 1 en 2 van deze bijlage lag de focus op een enkel veehouderijbedrijf, waarvoor een enkele bron of een aantal bronnen zijn doorgerekend om de concentraties rondom de stal te kunnen berekenen.

In deze paragraaf wordt het brongebied opgeschaald naar het VGO onderzoeksgebied, namelijk het oostelijk deel van de provincie Noord-Brabant en het noordelijk deel van de provincie Limburg (ook aangegeven in Figuur 2.2 van het VGO hoofdrapport (Maassen, 2016). Dit is een gebied van 64x64 km². Omdat de omzetting van fijnstof naar endotoxinen en/of micro-organismen kan verschillen per diersoort, zijn ook aparte simulaties gedaan per diersoort, zijnde leghennen, vleeskuikens, vleesvarkens en fokvarkens. Bij de boerderijmetingen en lokale modellering keken we naar diertype 'zeugen', maar deze naamgeving was onbekend bij de emissieregistratie, en zodoende is gekozen voor 'fokvarkens' voor de modellering op regionale schaal.

3.1 Emissies

Uiteraard kan niet bij elke stal in het VGO onderzoeksgebied de emissiesterkte worden gemeten. Daarom is voor het bepalen van de emissiesterktes van fijnstof (PM₁₀) gebruik gemaakt van de gegevens van de Emissieregistratie (emissies uit het jaar 2014, geleverd in 2016). De Emissieregistratie heeft PM₁₀ emissies per stallocatie, gebaseerd op het aantal dieren en de emissiefactoren fijnstof in g/dier/jaar die zijn vastgesteld voor de diverse diersoorten en huisvestingssystemen⁵. Zodoende is dit een benadering van de PM₁₀ emissies, omdat dit allereerst jaargemiddelde waarden zijn en bijvoorbeeld het dierenaantal niet constant is doorheen het jaar (incidentele leegstand is wel meegenomen), en ook de ventilatiesterkte in werkelijkheid niet constant is⁶. Daarnaast kan er ook onzekerheid zijn in (het bepalen van) de emissiefactoren (zie Tabel 1).

⁵ Bron: Ministerie van IenM,

<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/publicaties/2016/03/15/emissiefactoren-fijn-stof-voor-veehouderij-2016>. Let op: dit is een oude versie. Op het moment van schrijven staat alleen de versie van 2017 online: <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/publicaties/2017/03/15/emissiefactoren-fijn-stof-voor-veehouderij-2017>.

⁶ De studie van Ogink et al. (2016) toonde aan dat de emissies overdag hoger zijn dan 's nachts, omdat de dieren overdag actiever zijn en meer warmte produceren. Hierdoor wordt de stofconcentratie hoger, en moet ook het debiet verhoogd worden om deze warmte af te voeren voor een optimalere klimaatconditie in de stal. Dit effect is niet meegenomen in de modellering.

Tabel 1. Voorbeelden van PM_{10} emissiefactoren en geschatte onzekerheid voor een aantal pluimvee- en varkensveehouderijtypen. Let op dat voor de vleesvarkens en dragende zeugen de emissiesterkte verschilt t.o.v. wat is gepubliceerd door het ministerie van Infrastructuur en Milieu. Let op dat dit ook niet de emissiefactoren van alle bestaande staltypen geeft; bij de regionale modellering worden dus ook andere staltypen meegenomen.

Diertype (WUR rapportnr.: Winkel et al., 2009a; 2009b; 2010; 2011; Mosquera et al., 2009a; 2009b; 2010a; 2010b)	PM_{10} emissie (g/dierplaats/jaar)	Onzekerheid (%)	Leegstand (%)	PM_{10} emissie (g/dierplaats/jaar) met correctie voor leegstand	Onzekerheid (%)
Vleeskuikens (275)	26.8±8.8	33	18	21.9±7.3	33
Groot(ouder)dieren van vleeskuikens (276)	49.1±1.0	2	13	42.7±0.9	2
Leghennen in volierehuishouding (278)	67.3±13.8	21	4	64.6±13.2	20
Leghennen in scharrelhuisvesting (279)	87.1±32.9	38	4	83.6±31.5	38
Leghennen in stallen met een droogtunnel (280)	3.9±1.7	44	Niet bepaald	-	-
Vleesvarkens traditionele stal (292)	144.0±65.4	45	3	139.7±63.4	45
Vleesvarkens, stal met beperkt emitterend oppervlak en droogvoer (292)	200.8±49.5	25	3	194.7±48.0	25
Vleesvarkens, stal met beperkt emitterend oppervlak en brijvoer (292)	140.3±2.5	2	3	136.1±2.4	2
Biggen, gedeeltelijk roostervloer (293)	81.2±4.0	5	9	73.9±3.6	5
Biggen, volledig roostervloer (293)	62.0±15.0	24	9	56.4±13.6	24
Dragende zeugen, individuele huisvesting (294)	186.3±18.7	10	3	180.7±18.2	10
Dragende zeugen, groepshuisvesting (294)	173.7±82.6	48	3	168.5±80.1	48

Voor de modellering op regionale schaal worden vervolgens voor de vier diersoorten alle emissies per bedrijfslocatie gebruikt die binnen het VGO onderzoeksgebied liggen en tot 5km daarbuiten (dus voor een gebied van 74x74 km²). Emissieregistratie beschikt alleen over Nederlandse brongegevens, en zodoende zijn de bronnen van België en Duitsland die grenzen aan het VGO onderzoeksgebied niet meegenomen. Hierdoor kan bij wind vanuit België of Duitsland de concentratie worden onderschat, met name vlakbij de grens. Meer naar het centrum van het VGO onderzoeksgebied hebben de lokale bronnen een belangrijker aandeel dan de buitenlandse bronnen en zal dit effect kleiner zijn.

De concentraties die zijn gemeten in dit 74x74 km² gebied bestaan uit deeltjes afkomstig uit dit gebied, maar ook buiten dit gebied. Daarnaast zijn meerdere bronsoorten dan slechts de 4 afzonderlijke diersoorten verantwoordelijk voor de concentraties. Zodoende kunnen modelresultaten niet één op één vergeleken worden met metingen,

maar wel kan iets worden gezegd over de concentraties en blootstelling door uitstoot van bijvoorbeeld leghennenbedrijven binnen dat gebied.

3.2 Deeltjesgrootte

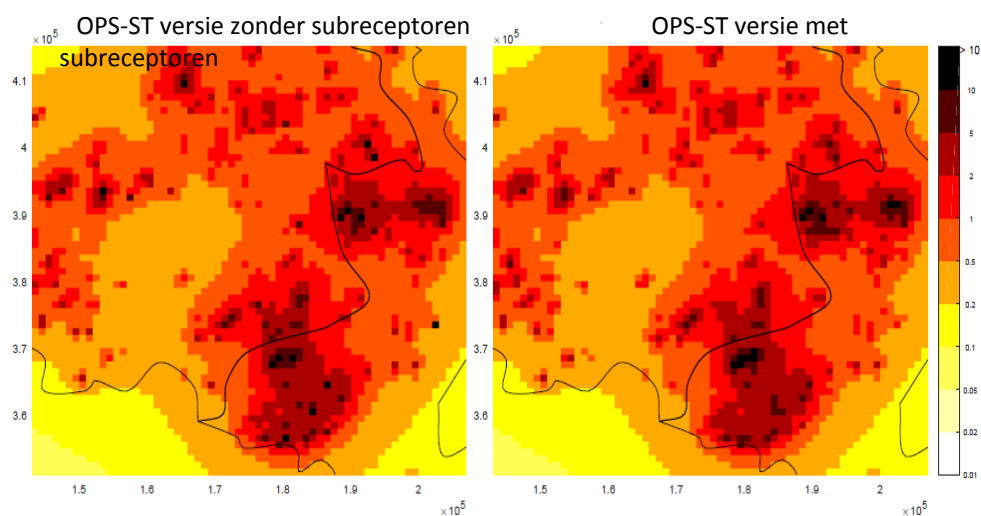
Het OPS-ST model berekent ook grotere stofdeeltjes dan PM_{10} . De gebruikte deeltjesgrootte-verdeling wordt aangegeven met massafracties. Deze verdeling kan ook gebruikt worden om een correctie te doen op de PM_{10} emissies. Wanneer we bijvoorbeeld zouden aannemen volgens de deeltjesgrootteverdeling dat 80% van de massafractie in PM_{10} zit, kan de emissiesterkte van PM_{10} vermenigvuldigd worden met 1.25 ($=100\%/80\%$) om tot de emissiesterkte van PM_{50} te komen. Uiteraard hangt deze omrekeningsfactor af van de gekozen deeltjesgrootteverdeling en de diersoort. Wederom is voor de stofdeeltjesgrootteverdeling van Lai et al. (2014) gekozen (zie ook Bijlage 09). Met behulp van deze data hebben we een correctie gedaan van PM_{10} emissies naar PM_{50} emissies.

3.3 Verspreidingsmodellering met OPS-ST

Bij de verspreidingsmodellering van de afzonderlijke veehouderijen zijn de modelsimulaties uitgevoerd op specifieke receptoren, namelijk die locaties waar ook de metingen zijn uitgevoerd. Bij de modellering op regionale schaal wordt gerekend voor een gridveld aan receptorpunten die liggen binnen het VGO onderzoeksgebied van $64 \times 64 \text{ km}^2$. Hiervoor is een resolutie van $1 \times 1 \text{ km}^2$ gebruikt.

Hierbij moet worden opgemerkt dat met het OPS model de één op één relatie tussen de bron en de receptor wordt uitgerekend om de concentratie te bepalen. Daardoor zou het kunnen dat de concentratie berekend op de receptor niet representatief is voor het gemiddelde van het $1 \times 1 \text{ km}^2$ vlak. Dit is met name het geval wanneer een bron vlakbij de receptor ligt. Daarom raden we aan om bij de resultaten weergegeven in de figuren niet te kijken naar de afzonderlijke pieken, maar meer naar de algemene concentratieverdeling over het grotere gebied.

Een oplossing hiervoor zou zijn om subreceptoren in te bouwen in het model. Wanneer dan een bron vlakbij de 'hoofdreceptor' ligt, kan het gridveld worden onderverdeeld in meerdere subreceptoren waar apart de concentratie voor wordt uitgerekend. Deze worden vervolgens gemiddeld om tot een gridgemiddelde concentratie te komen. Op deze manier is de concentratie meer representatief voor de hele gridcel. Er is gewerkt aan de implementatie van subreceptoren in OPS-ST. Eerste testresultaten laten overeenkomstige concentratiepatronen zien. Wel zijn enkele piekconcentraties afgezwakt, en kunnen sommige gridcelgemiddeldewaarden toenemen t.o.v. de enkele receptor in het grid wanneer toevallig het centrumreceptorpunt relatief ver weg ligt van de bronnen. Een voorbeeld voor leghennen is getoond in Figuur 2.



Figuur 2. Jaargemiddelde berekende concentratie [microgram per kubieke meter lucht] aan stof kleiner dan 50 micrometer door uitstoot vanuit leghennenhouderijen voor het jaar 2014.

3.4 Discussie

Tijdens het VGO onderzoek is slechts bij enkele stallen de deeltjesgrootteverdeling gemeten met daarbij de verdeling van micro-organismen over de deeltjesgrootteverdeling. Deze stallen zijn meestal van hetzelfde type huisvesting, zonder luchtwassers. Alleen bij vleeskuikens is er verschil in staltype geweest, namelijk regulier en een stal geschikt voor 'Beter Leven' kippen.

Voor de verspreidingsmodellering is voor alle bronnen van hetzelfde diertype binnen het VGO-onderzoeksgebied wel dezelfde deeltjesgrootteverdeling aangenomen. Dit geldt ook voor de omzettingfactoren om gemodelleerde stofconcentraties om te rekenen naar concentraties endotoxinen en micro-organismen. Oftewel als voorbeeld, voor alle emissies van leghennenbedrijven, wordt de verdeling zoals gemeten bij een volièresysteem gebruikt.

Wat betreft de stofemissies verwachten we geen grote verschillen wanneer onderscheid zou worden gemaakt tussen leghennen in een volièresysteem en leghennen in een vloer-huisvestingsysteem, of wanneer onderscheid wordt gemaakt tussen vleesvarkens in een traditionele stal, of vleesvarkens in een lage-emissie-huisvestingsysteem met droog/nat voer. De deeltjesgrootteverdelingen voor deze afzonderlijke stalssystemen lijken namelijk sterk op elkaar (Lai et al., 2014). Echter, over hoe de micro-organismen en endotoxinen over de verschillende stofdeeltjesgrootteklassen verdeeld zijn bij verschillende stal- en managementsystemen is geen informatie bekend.

4 Bibliografie

Aarnink, A. J. A., J. Mosquera, M. Cambra López, H. I. J. Roest, J. M. G. Hol, M. C. Van der Hulst, Y. Zhao, J. W. H. Huis in 't Veld, F. A. Gerrits, and N. W. M. Ogink. (2012). Emissies van stof en ziektekiemen uit melkgeitenstallen. Wageningen UR Livestock Research. Lelystad: Wageningen UR Livestock Research.

Thomas Hagens, José Gonzales, Clazien de Vos (Wageningen Bioveterinary Research)
André Aarnink (Wageningen Livestock Research). (2017) Modelling emission of bio-aerosols carrying zoonotic microorganisms from livestock houses: quantification data and knowledge gaps. Bijlage bij aanvullende studies VGO.

CIGR. (2002). Heat and moisture production at animal and house levels. CIGR Working Group on Climatization of Animal Houses. http://www.cigr.org/documents/CIGR_4TH_WORK_GR.pdf

Klimaatplatform Varkenshouderij (2014). Richtlijnen klimaatinstellingen. https://www.wur.nl/upload_mm/d/e/9/2156ebbe-3618-457a-ae50-48736949e888_RICHTLIJNEN%20klimaatinstellingen%20augustus%202014.pdf

Lai HTL, Aarnink AJA, Cambra-López M, Huynh TTT, Parmentier HK, Groot Koerkamp PWG (2014) Size distribution of airborne particles in animal houses. *Agric. Eng. Int.: CIGR Journal* 16(3):28-42

Maassen K., Smit L., Wouters I., van Duijkeren E., Janse I., Hagens T., IJzermans J., van der Hoek W., Heederik D. (2016). Veehouderij en gezondheid omwonenden. RIVM, Bilthoven.

Mosquera, J., R. A. van Emous, A. Winkel, F. Dousma, E. Lovink, N. W. M. Ogink, A. J. A. Aarnink. 2009a. Fijnstofemissie uit stallen: (groot)ouderdieren van vleeskuikens. Rapport 276. Lelystad, the Netherlands: Wageningen UR Livestock Research.

Mosquera, J., A. Winkel, F. Dousma, E. Lovink, N. W. M. Ogink, A. J. A. Aarnink. 2009b. Fijnstofemissie uit stallen: leghennen in scharrelhuisvesting. Rapport 279. Lelystad, the Netherlands: Wageningen UR Livestock Research.

Mosquera, J., J. M. G. Hol, A. Winkel, E. Lovink, N. W. M. Ogink, A. J. A. Aarnink. 2010a. Fijnstofemissie uit stallen: vleesvarkens. Rapport 292. Lelystad, the Netherlands: Wageningen UR Livestock Research.

Mosquera, J., J. M. G. Hol, A. Winkel, G. M. Nijeboer, N. W. M. Ogink, A. J. A. Aarnink. 2010b. Fijnstofemissie uit stallen: dragende zeugen. Rapport 294. Lelystad, the Netherlands: Wageningen UR Livestock Research.

Ogink, N. W., Mosquera, J., Calvet, S., & Zhang, G. (2013). Methods for measuring gas emissions from naturally ventilated livestock buildings: developments over the last decade and perspectives for improvement. *Biosystems Engineering*, 116(3), 297-308.

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. Wageningen UR Livestock Research rapport 959.

Pedersen, S., Blanes-Vidal, V., Joergensen, H., Chwalibog, A., Haeussermann, A., & Heetkamp, M. J. W. (2008). Carbon dioxide production in animal houses: a literature review. *Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal X*, 1-19.

Sauter F, Van Zanten M, Van der Swaluw E, Aben J, De Leeuw F, Van Jaarsveld H (2016) The OPS-model, Description of OPS 4.5.0. <http://www.rivm.nl/media/ops/OPS-model.pdf>

Sauter F, Sterk M (In preparation) Documentation OPS-ST v11.1.1.

Van Leuken JPG, Swart AN, Havelaar AH, Van Pul A, Van der Hoek W, Heederik D. (2016). Atmospheric dispersion modelling of bioaerosols that are pathogenic to humans and livestock – A review to inform risk assessment studies. *Microbiol. Risk Anal.* 1:19-39.

Wieringa, J., and Rijkoort P.J. (1983). Windklimaat van Nederland. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. Staatsuitgeverij Den Haag.

Winkel, A., J. Mosquera, R. K. Kwikkel, F. A. Gerrits, N. W. M. Ogink, A. J. A. Aarnink. 2009a. Fijnstofemissie uit stallen: vleeskuikens. Rapport 275. Lelystad, the Netherlands: Wageningen UR Livestock Research.

Winkel, A., J. Mosquera, J. M. G. Hol, G. M. Nijeboer, N. W. M. Ogink, and A. J. A. Aarnink. 2009b. Fijnstofemissie uit stallen: leghennen in volièrehuisvesting. Rapport 278. Lelystad, the Netherlands: Wageningen UR Livestock Research.

Winkel, A., J. Mosquera, J. M. G. Hol, T. G. van Hattum, E. Lovink, N. W. M. Ogink, A. J. A. Aarnink. 2010. Fijnstofemissie uit stallen: biggen. Rapport 293. Lelystad, the Netherlands: Wageningen UR Livestock Research.

Winkel, A., J. Mosquera, H. H. Ellen, R. A. Van Emous, J. M. G. Hol, G. M. Nijeboer, N. W. M. Ogink, A. J. A. Aarnink. 2011. Fijnstofemissie uit stallen: leghennen in stallen met een droogtunnel. Rapport 280. Lelystad, the Netherlands: Wageningen UR Livestock Research.