

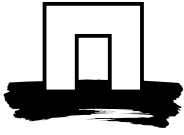


Depositie van fijnstofdeeltjes

Eigenschappen van fijnstofdeeltjes die de afvangkans door een gewas beïnvloeden

Annette Pronk, Henk Jan Holterman en Nico Ogink





Depositie van fijnstofdeeltjes

Eigenschappen van fijnstofdeeltjes die de afvangkans door een gewas beïnvloeden

Annette Pronk¹, Henk Jan Holterman¹ en Nico Ogink²

¹ Plant Research international

² Livestock Research

© 2013 Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Plant Research International. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van DLO.

Voor nadere informatie gelieve contact op te nemen met: DLO in het bijzonder onderzoeksinstituut Plant Research International, Agrosysteemkunde.

DLO is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Exemplaren van dit rapport kunnen bij de (eerste) auteur worden besteld. Bij toezending wordt een factuur toegevoegd; de kosten (incl. verzend- en administratiekosten) bedragen € 50 per exemplaar.

Plant Research International, onderdeel van Wageningen UR Business Unit Agrosysteemkunde

Adres : Postbus 616, 6700 AP Wageningen
: Wageningen Campus, Droevendaalsesteeg 1, Wageningen
Tel. : 0317 – 48 04 78
Fax : 0317 – 41 80 94
E-mail : info.pri@wur.nl
Internet : www.wageningenUR.nl/pri

Inhoudsopgave

	pagina
Voorwoord	1
Samenvatting	3
Summary	5
1. Inleiding	7
2. De invloed van eigenschappen van deeltjes op depositie van fijnstof	9
2.1 Inleiding	9
2.2 Depositie van fijnstof	9
2.3 Beweging van deeltjes in lucht	10
2.4 Sedimentatie	11
2.5 Impactie	11
2.6 Diffusie	12
2.7 De aerodynamische diameter	12
2.8 Het effect van dichtheid en aerodynamische diameter op de afvangkans	13
3. Toepassen van deze theorie op bekende meetgegevens	17
4. Discussie	19
4.1 De invloed van eigenschappen van deeltjes op de depositie	19
4.2 Verbetering luchtkwaliteit ventilatielucht veehouderij door groenelementen	21
5. Conclusies	23
Referenties	25

Voorwoord

Om te kunnen voldoen aan Europese normen voor de maximale concentraties van fijnstof in de buitenlucht, dienen in Nederland maatregelen te worden doorgevoerd die de emissie uit belangrijke bronnen terugdringen. Binnen dit kader is het onderzoek naar de interceptie van fijnstof uit de veehouderij door groenelementen gestart. Veldproeven hebben laten zien dat onder ideale omstandigheden fijnstofdeeltjes kunnen worden afgevangen. Dit veldonderzoek was tevens de aanleiding om de processen van depositie van 'grotere' fijnstofdeeltjes nader te bekijken.

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het ministerie van Economische Zaken (EZ) in het kader van het 'Plan van aanpak bedrijfsoplossingen voor fijnstofreductie in de pluimveehouderij'.

Annette Pronk
Projectleider
Plant Research International, Wageningen UR

Samenvatting

De depositie van fijnstof op beplanting hangt af van veel factoren: de eigenschappen van de deeltjes, de eigenschappen van het botsingsoppervlak en van omgevingsfactoren. Recent onderzoek naar de depositie van kunstmatig fijnstof op een bomenrij laat zien dat deeltjes op de bomen terecht komen. Om deze resultaten te vertalen naar afvangpercentages van fijnstof uit de veehouderij (3 – 10 μm) is het noodzakelijk om de representativiteit van kunstmatig fijnstofdeeltjes voor fijnstof afkomstig uit de veehouderij vast te stellen. Welke eigenschappen van de deeltjes daarbij de doorslag geven wordt in deze studie onderzocht.

Bij het vaststellen van fijnstofconcentraties in de lucht worden alle gevangen deeltjes met een bijbehorende geometrische diameter, omgerekend naar een dichtheid van 1 g.cm^{-3} met een bijbehorende aerodynamische diameter, zodanig dat de sedimentatiesnelheid van het oorspronkelijke deeltje gelijk is aan de sedimentatiesnelheid van fijnstofdeeltjes met deze aerodynamische diameter. Hierdoor is bij de benaming van PM_{10} sprake van gestandaardiseerde deeltjes met een dichtheid van 1 g.cm^{-3} . Tevens is hierdoor gecorrigeerd voor een afwijkende vorm van de fijnstofdeeltjes van volledig bolvormig.

Depositie van deeltjes met een aerodynamische diameter van 3 – 10 μm treedt hoofdzakelijk op door impactie. Dat is het proces waarbij deeltjes de veranderende luchtstroom niet kunnen volgen door hun eigen traagheid (massa), de bocht uit vliegen en zo tegen het botsingsoppervlak aan botsen. De kans dat een deeltje tegen het botsingsoppervlak aan vliegt is gedefinieerd als de fractie van de recht op het botsingsobject af vliegende deeltjes die dit niet meer kunnen ontwijken. Deze kans hangt af van de deeltjesgrootte (aerodynamische diameter), de windsnelheid en de grootte van het botsingsobject. De onderlinge samenhang tussen deze factoren wordt beschreven met het Stokesgetal. Deeltjes met dezelfde aerodynamische diameter hebben hetzelfde Stokesgetal en daarmee dezelfde botsingskansen. Alleen bij kleine waarden van het Stokesgetal, $<0,06$, treden verschillen op. Deze verschillen ontstaan doordat deeltjes dan vlak langs het botsingsoppervlak scheren.

Voor de vertaling van de resultaten van de veldexperimenten naar de depositie van droge, kunstmatige fijnstofdeeltjes in een groenelement tot de depositie van PM_{10} uit de veehouderij is de geometrische diameter omgerekend naar de aerodynamische diameter en is een vormcorrectie toegepast. De afvangkans van PM_{10} is iets lager dan de afvangkans van het kunstmatig fijnstof van de veldexperimenten, tot maximaal 25% van het fijnstof dat de haag invliegt. Dit is de ondergrens van wat verwacht mag worden doordat deze resultaten voor droge deeltjes gelden. Mooie, ronde fijnstofdeeltjes uit de veehouderij zijn hygroscopisch en groeien vanaf een relatieve luchtvochtigheid van 75 à 80% tot maximaal twee maal de oorspronkelijke diameter. De relatieve luchtvochtigheid in stallen is doorgaans 60 tot 70% waardoor de deeltjes waarschijnlijk niet krimpen als ze in de buitenlucht terecht komen. In vochtige buitenlucht groeien de deeltjes en neemt de afvangkans van fijnstof uit de veehouderij door een groenelement van grove den toe.

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

- Impactie van deeltjes is sterk afhankelijk van de diameter en alleen bij kleine Stokesgetallen ($<0,06$) speelt de dichtheid van de deeltjes ook een rol.
- De omrekening van de geometrische diameter van kunstmatig fijnstof naar de aerodynamische diameter voor de berekening van de afvangkans van PM_{10} laat zien dat PM_{10} tot maximaal 25% wordt afgevangen door een haag van grove den (*Pinus sylvestris*).
- Fijnstofdeeltjes uit kippenstallen krimpen waarschijnlijk niet als de relatieve luchtvochtigheid in de buitenlucht lager is dan die in de stal.
- Fijnstofdeeltjes uit kippenstallen groeien waarschijnlijk als de relatieve luchtvochtigheid in de buitenlucht groter is dan 75 à 80% tot maximaal twee maal de oorspronkelijke diameter.
- De meetresultaten met de kunstmatige, droge fijnstofdeeltjes geven een ondergrens aan van de depositie die verwacht mag worden in een groenelement.
- Depositie is een belangrijke maar niet de enige factor die bepaalt welke bijdrage een groenelement heeft bij het verbeteren van de luchtkwaliteit rondom stallen.

Summary

Deposition of particulate matter on plants depends on many factors: characteristics of the particles, characteristics of the deposition surfaces and environmental factors. A recent study on deposition of artificial particles on a hedge shows that a substantial part of the particles deposits on the trees. However, artificial particles may differ in deposition from the deposition of particulate matter from animal houses (3 – 10 μm) and it is necessary to identify which characteristics of particles need to be investigated to compare artificial particles with particulate matter from animal housing

Measurements on particulate matter concentrations in the air are based on the aerodynamic diameter with a bulk density of 1 g.cm^3 , the so called PM_{10} . The ambient particulate matter concentration in the air is corrected in such a way that the sedimentation remains the same by an adaption of the diameter. Ambient particles are also corrected for their shape to round particles. So when PM_{10} is mentioned particles in definition have an aerodynamic diameter and a completely round shape.

Deposition of particles with an aerodynamic diameter between 3 – 10 μm is mainly by impaction. Particles cannot follow the wind as it flows around an object due to their mass. They literally miss the turn and impact in the object. The chance that a particle impacts on an object is defined as the fraction of particles approaching the object that can not miss the object, the so called capture efficiency. This capture efficiency depends mainly on the particle diameter (aerodynamic diameter), the wind speed and the size of the object. The relationship between these parameters is described by the Stokes number. Particles with the same aerodynamic diameter have the same Stokes number and consequently the same chance to impact. Only at very small Stokes numbers, <0.06 , differences in impaction occur. These differences occur as particles gaze past objects instead of impact.

For the translation of the results of a field study on the deposition of artificial particles on a hedge row to PM_{10} of animal housing, the geometric diameter has been converted to the aerodynamic diameter and the correction for shape has been performed. The thus calculated capture efficiency of PM_{10} is slightly lower than of the artificial particles of the field experiments, up to a maximum of 25% of the dust entering the hedge row. This can be considered the lower boundary of the capture efficiency as results are for completely dry particles. Spherical smooth particles from animal housing are hygroscopic and expected to grow up to twice the original diameter when the relative humidity increases above 75 to 80%. As the relative humidity in animal housing is around 60 to 70% emitted particles will most likely not shrink in the outside air, However, in humid outside air, these particles may grow which increases the capture efficiency of particulate matter from animal housing in a hedge row of Scott's pine.

Based on the results of this study the following can be concluded:

- Impaction of particles depends mainly on the diameter of the particles and only at small Stokes numbers (<0.06) bulk density has an effect as well.
- The conversion of the geometric diameter of artificial particulate matter to particulate matter with an aerodynamic diameter, PM_{10} , shows that PM_{10} deposits up to a maximum of 25% on a hedge of Scott's pine (*Pinus sylvestris*).
- Particulate matter from poultry stables will most probably not shrink when the relative humidity in the outside air is lower than in the animal housing.
- Particulate matter from poultry stables will most probably grow when the relative humidity in the outside air is larger than 80% up to a maximum of 2 times the original diameter.
- The results on deposition of particles in the field experiments show the minimum of the expected amount of deposition.
- Deposition is an important but not the only factor when hedge rows are to be evaluated on their capability to mitigate dust emissions of animal housing.

1. Inleiding

De norm voor fijnstofdeeltjes in de lucht is vastgesteld voor deeltjes tot een aerodynamische diameter van 10 μm , de zogenaamde PM_{10} norm. Het gaat daarbij om deeltjes van verschillende oorsprong en samenstelling en de diversiteit van de deeltjes is enorm.

Fijnstofdeeltjes worden uit de lucht verwijderd via natte en droge depositie. Natte depositie is het proces waarbij deeltjes via regen op een vast oppervlak terecht komen. Deze vorm van depositie treedt alleen op als het regent, is daardoor episodisch (7,5% van de tijd regent het in Nederland; www.knmi.nl/cms/content/24936/neerslagduur, en verwijdert fijnstof vanuit hogere luchtlagen naar het grondoppervlak (QUARG 1996). Droge depositie treedt alleen op in de lagere luchtlagen en is een continue proces. Droge depositie is tevens het proces waarbij beplanting zoals groenelementen, een rol kan spelen bij het bevorderen van de depositie (Pronk *et al.*, 2013).

De depositie van fijnstof op beplanting hangt af van veel factoren: de eigenschappen van de deeltjes, de eigenschappen van het botsingsoppervlak en van omgevingsfactoren. Recent onderzoek naar de depositie van kunstmatig gemaakt fijnstof op een bomenrij laat zien dat deeltjes op de bomen terecht komen (Pronk *et al.*, 2012). De aanzienlijke reductie van ongeveer 30% (op massabasis) voor deze kunstmatige deeltjes hangt eveneens af van de bovengenoemde factoren: eigenschappen van de deeltjes, eigenschappen van het botsingsoppervlak en omgevingsfactoren. Hierdoor komt de vraag naar voren hoe de gevonden onderzoeksresultaten vertaald kunnen worden naar de depositie van fijnstof uit de veehouderij voor eenzelfde groenelement, d.w.z. eenzelfde botsingsoppervlak.

Deze studie beantwoordt de vraag welke eigenschappen van deeltjes doorslaggevend zijn voor de depositie van fijnstof. Hiervoor is het nodig om te bekijken welke eigenschappen van invloed zijn op de afvangkans van de fijnstofdeeltjes, omdat de afvangkans uiteindelijk de depositie bepaalt. De geïdentificeerde eigenschappen dienen vervolgens onderzocht te worden voor het kunstmatige fijnstof en vergeleken te worden met de eigenschappen van fijnstof uit de veehouderij. Zo kan een adequate schatting gemaakt worden voor de verwachte depositie van fijnstof uit de veehouderij door groenelementen. In deze studie wordt aangenomen dat verschillen in depositie van kunstmatige fijnstofdeeltjes en fijnstofdeeltjes uit de veehouderij in mindere mate afhankelijk zijn van de eigenschappen van het botsingsoppervlak.

2. De invloed van eigenschappen van deeltjes op depositie van fijnstof

2.1 Inleiding

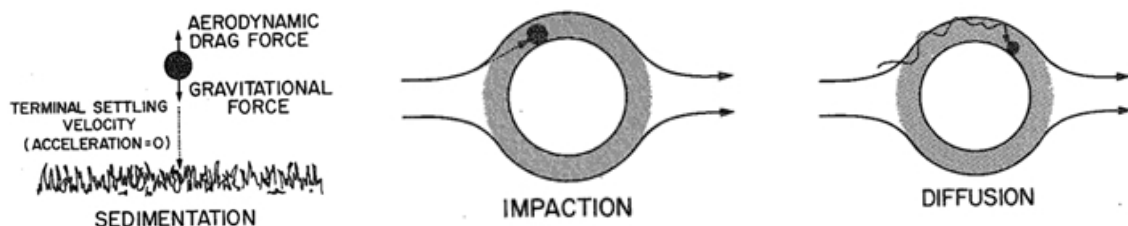
Voor een verdere uitwerking van de eigenschappen van deeltjes op de depositie van fijnstof is het noodzakelijk een aantal begrippen te introduceren en een aantal vereenvoudigingen aan te brengen. Tevens wordt een kort overzicht van de processen gegeven waarna deze in meer detail worden uitgewerkt.

2.2 Depositie van fijnstof

In de natuurkunde betekent 'depositie' het neerslaan van deeltjes (en gassen) op een vaste ondergrond. De snelheid waarmee deze deeltjes deponeren heet de depositiesnelheid en deze wordt uitgedrukt in afstand/tijd.

Voor 'het neerslaan van deeltjes op een vaste ondergrond' zijn een aantal processen geïdentificeerd:

- Sedimentatie (Figuur 1, links). Dit is het proces waarbij een deeltje door zijn eigen gewicht naar de aarde toe beweegt. De zwaartekracht is de overheersende kracht, en sedimentatie speelt dan ook vooral een rol bij grotere (zwaardere) deeltjes.
- Impactie (Figuur 1, midden). Dit is het proces waarbij deeltjes tegen het oppervlak aanbotsen. Het deeltje heeft een snelheid als de lucht van richting verandert en om het oppervlak heen buigt. Door deze voorwaartse snelheid vliegt het deeltje rechtdoor en botst tegen het oppervlak. De tijd die een deeltje nodig heeft om zich aan te passen aan het veranderende windveld, heet de relaxatietijd (τ , s). Hoe ver een deeltje door vliegt voordat het tot stilstand komt heet de 'stopping distance'. Een deeltje kan het oppervlak ook schampen. Sommige literatuur onderscheidt dit 'schampen' van impactie en noemt het 'interceptie' (Davidson & Wu 1990), omdat ook bij schampen een gedeelte van de deeltjes alsnog aan het oppervlak blijft kleven. In navolging van Raupach *et al.* (2001) wordt dit schampen in deze studie als een vorm van impactie beschouwd.
- Diffusie, inclusief de Brownse beweging (Figuur 1, rechts). Diffusie is het proces waarbij een deeltje zich verplaatst door een concentratieverschil omdat het een uniforme concentratie nastreeft. Aan het vaste oppervlak is de concentratie nul en deeltjes bewegen zich daardoor naar het vaste oppervlak toe. De Brownse beweging is het proces waarbij deeltjes onregelmatige en toevallige bewegingen vertonen, voortkomend uit interne botsing van de moleculen. Diffusie speelt alleen een rol bij zeer kleine deeltjes waar impactie en sedimentatie verwaarloosbaar zijn.

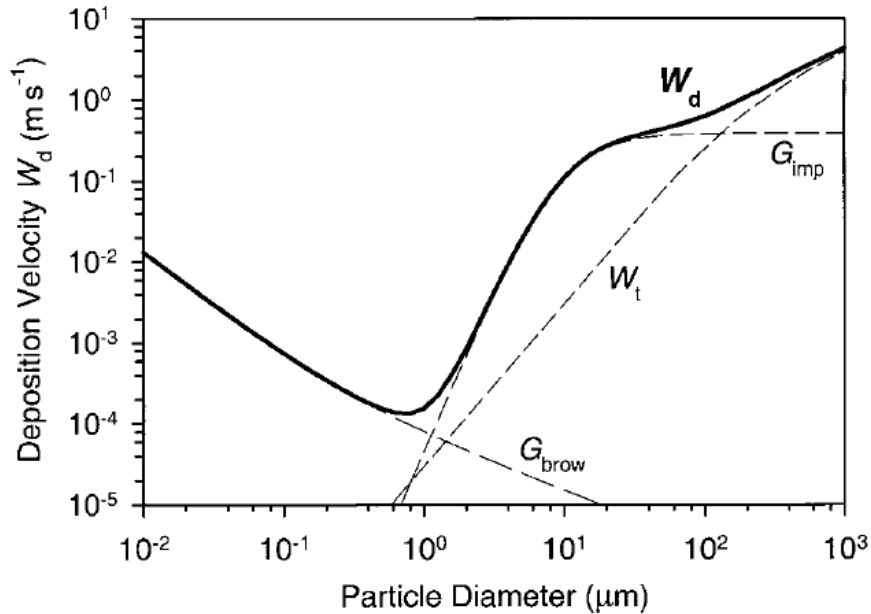


Figuur 1. Schematische voorstelling van de drie processen van afvangst van deeltjes op een oppervlakte (Davidson & Wu 1990).

In principe komen alle processen naast elkaar voor maar één proces heeft doorgaans de overhand. Welk proces de overhand heeft is in grote mate afhankelijk van de (aerodynamische) diameter van de deeltjes (Figuur 2). Tot een

(aerodynamische) diameter van $0,5 \mu\text{m}$ is het overheersende proces diffusie, van $0,5$ tot ongeveer $2 \mu\text{m}$ is dit interceptie en vanaf $2 \mu\text{m}$ is dit impactie of sedimentatie. Sedimentatie komt alleen voor in stilstaande lucht en is tot deeltjes van $10 \mu\text{m}$ beduidend kleiner dan impactie. De afvangst is in het algemeen het laagste voor deeltjes met een diameter van $0,05$ tot $2 \mu\text{m}$ (QUARG 1996).

In de hierna volgende paragrafen wordt eerst sedimentatie verder uitgewerkt, gevolgd door impactie. Omdat diffusie vooral optreedt bij erg kleine deeltjes en die voor veehouderij minder van belang zijn (Aarnink *et al.*, 2011), wordt hier geen aandacht aan besteedt.



Figuur 2. De bijdrage van de drie genoemde depositieprocessen, sedimentatie (W_t), impactie (G_{imp}), Brownse beweging (G_{brow}) aan de depositiesnelheid (W_d) bij een weerstandswindsnelheid van $1,4 \text{ m.s}^{-1}$ (Raupach *et al.*, 2001).

2.3 Beweging van deeltjes in lucht

Deeltjes die zich voortbewegen in lucht hebben te maken met zwaartekracht en de weerstandskracht van lucht die het deeltje omstroomt. Deze krachten bepalen de beweging van het deeltje en de weg die het aflegt. Een belangrijke parameter in dit proces is de zogenaamde relaxatietijd τ , een maat voor de tijd die het deeltje nodig heeft om zich aan te passen aan wisselende omstandigheden, zoals veranderingen in de lokale luchtstroming. Zie ook (Holterman 2003) voor een uitgebreide toelichting van de in deze en volgende paragrafen beschreven fysische processen. Voor relatief kleine deeltjes (waartoe ook stofdeeltjes behoren) is de relaxatietijd met de volgende formule te beschrijven:

$$\tau = \frac{\rho_d d^2}{18\eta_a} \quad [\text{s}] \quad 1)$$

Hierin is ρ_d de dichtheid van het deeltje [kg.m^{-3}], d zijn (geometrische) diameter [m] en η_a de dynamische viscositeit van lucht [$\sim 18 \cdot 10^{-6} \text{ Pa.s}$]. Bovenstaande vergelijking mag toegepast worden als de stroming van lucht rondom het deeltje weinig of geen turbulentie veroorzaakt. De stroming wordt dan laminair genoemd. Dit kan beoordeeld worden op basis van het dimensieloze Reynoldsgetal Re , gedefinieerd als:

$$\text{Re} = \frac{\rho_a d v}{\eta_a} \quad [] \quad 2)$$

Hierin is ρ_a de dichtheid van lucht [$\sim 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$] en v het snelheidsverschil tussen het bewegende deeltje en de omringende lucht [m.s^{-1}]. Voor $Re < 0,25$ is de luchtstroming rondom het deeltje laminair en is vergelijking (1) toepasbaar. In situaties met $Re > 0,25$ is de stroming niet meer zuiver laminair maar treedt er turbulentie op. De weerstandskrachten op een deeltje nemen dan toe, waardoor de relaxatietijd lager is dan met vergelijking (1) zou worden berekend.

2.4 Sedimentatie

Als het deeltje onder invloed van de zwaartekracht naar beneden zakt, zal er een tegengestelde weerstandkracht door luchtwrijving optreden. De zwaartekracht is constant maar zal het deeltje versnellen; de weerstandskracht neemt daardoor toe. Uiteindelijk balanceren deze beide krachten elkaar en valt het deeltje met constante snelheid naar beneden. Deze sedimentatiesnelheid v_s wordt gegeven door:

$$v_s = \tau g \quad [\text{m.s}^{-1}] \quad 3)$$

waarin g de valversnelling is ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$). Voor een stofdeeltje met een diameter van $10 \mu\text{m}$ en een dichtheid van 1 g.cm^{-3} (1000 kg.m^{-3}) blijkt dat $\tau \approx 0,0003 \text{ s}$ en $v_s \approx 0,003 \text{ m.s}^{-1}$. Bij deze sedimentatiesnelheid is $Re \approx 0,002$ dus vergelijking (1) mag inderdaad gebruikt worden.

Uit Figuur 2 blijkt dat voor stofdeeltjes de bijdrage aan depositie door sedimentatie gewoonlijk erg klein is. Dit wordt bevestigd door de lage sedimentatiesnelheid zoals in het voorbeeld aangegeven.

2.5 Impactie

Bij impactie tussen een stofdeeltje en een object (bijvoorbeeld een tak, blad of naald) speelt de traagheid van het stofdeeltjes een belangrijke rol. De lucht stroomt weliswaar om het object heen, maar het stofdeeltje kan door zijn eigen traagheid (massa) de luchtstroming niet geheel volgen en vliegt als het ware uit de bocht en treft het object. Dit botsingsproces hangt samen met de grootte van het stofdeeltje en het object, en de lokale windsnelheid. Variatie in deze grootheden heeft verschil in botsingskans tot gevolg. Om de genoemde grootheden in hun onderlinge samenhang te beschouwen, wordt het Stokesgetal St gebruikt:

$$St = \frac{s}{D} \quad [] \quad 4)$$

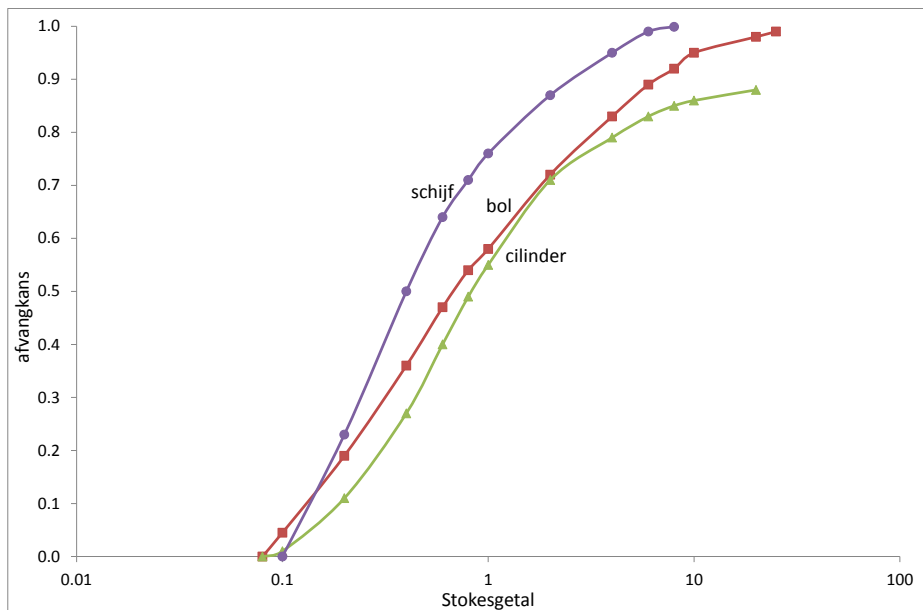
Het Stokesgetal is de verhouding tussen de 'stopping distance' s [m] en de karakteristieke grootte D van het object (bijv. gemiddelde diameter van de tak of naald). De stopping distance is de afstand die een deeltje aflegt, wanneer het met een bepaalde beginsnelheid wordt afgeschoten in stilstaande lucht. Op die afstand komt het deeltje dus tot stilstand. Stopping distance combineert de traagheid van het deeltje en het snelheidsverschil tussen deeltje en omringende lucht. Is St relatief klein ($< 0,1$), dan is de stopping distance dus klein ten opzichte van de afmetingen van het object. De kans op een botsing is dan klein, want het deeltje kan meestal op tijd tot stilstand komen. Is $St > 1$ dan is gewoonlijk de botsingskans vrij groot.

Voor een deeltje in een laminaire stroming hangt de stopping distance eenvoudig samen met de relaxatietijd en de beginsnelheid v_0 waarmee het afgeschoten wordt:

$$s = \tau v_0 \quad [\text{m}] \quad 5)$$

Bij impactie wordt geen stofdeeltje 'afgeschoten', maar heeft het een beginsnelheid nagenoeg gelijk aan de windsnelheid. Midden voor het object (bijv. de tak) is de (doorgaande) windsnelheid echter nul (lucht kan immers niet door de tak heen), dus is er wel sprake van een vrij plotseling snelheidsverschil. Daarom is ook in deze situatie de stopping distance een bruikbare parameter, waarbij v_0 vervangen moet worden door de windsnelheid v .

De botsingskans (of afvangkans) van deeltjes op een object wordt gedefinieerd als de fractie van recht op het object af komende deeltjes die het object niet meer kunnen ontwijken. Uit experimenteel onderzoek blijkt dat de botsingskans alleen een functie van St is, ongeacht de grootte van stofdeeltje, object of windsnelheid (May & Clifford 1967). Wel is deze functie afhankelijk van het type object: bijvoorbeeld voor cilindrische objecten geldt een iets andere functie dan voor bolvormige objecten. Figuur 3 laat de experimentele resultaten zien van May en Clifford voor schijfvormige, bolvormige en cilindervormige objecten. Bij schijfvormige en cilindrische objecten speelt hun oriëntatie ten opzichte van de luchtstroming ook een rol.



Figuur 3. De afvangkans van een bolvormig deeltje op verschillende objecten als functie van het Stokesgetal; naar experimenten van May en Clifford (1967).

2.6 Diffusie

Figuur 2 geeft aan dat depositie door diffusie alleen een rol speelt als Brownse beweging groter is dan sedimentatie en impactie. Dit treedt alleen op voor zeer kleine deeltjes (diameter $< 1 \mu\text{m}$). In veel gevallen is dit een verwaarloosbaar proces. Omdat zeer kleine deeltjes stofdeeltjes in de veehouderij minder van belang zijn (Aarnink *et al.*, 2011) wordt hier geen aandacht besteedt aan dit proces.

2.7 De aerodynamische diameter

In de voorgaande paragrafen is steeds verondersteld dat de stofdeeltjes bolvormig zijn. In werkelijkheid hebben fijnstofdeeltjes in het algemeen een onregelmatige vorm. Hierdoor is het moeilijk om ze met elkaar te vergelijken. Daarom worden deeltjes gestandaardiseerd naar een aerodynamische diameter. De aerodynamische diameter drukt uit hoe groot een perfect bolvormig deeltje met een gestandaardiseerde dichtheid ρ_0 ($1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) is, dat dezelfde sedimentatiesnelheid heeft als het werkelijke deeltje.

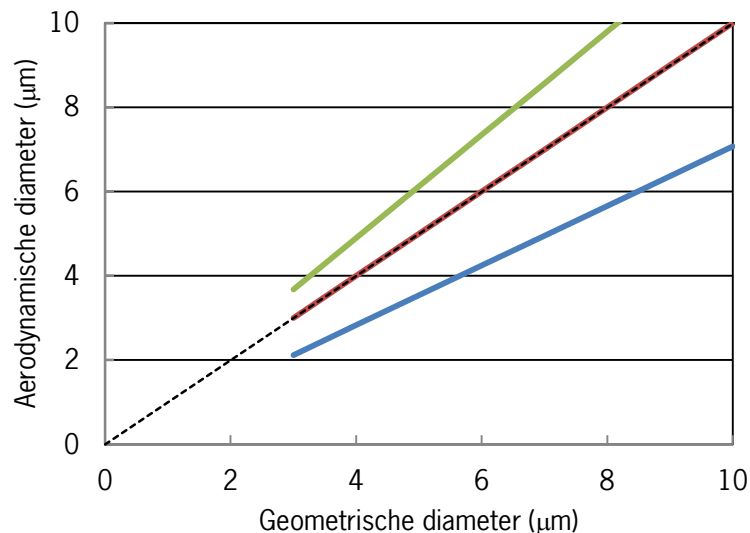
Volgens vergelijking (3) is de sedimentatiesnelheid evenredig met de relaxatietijd; deze laatste is volgens vergelijking (1) evenredig met de dichtheid en het kwadraat van de diameter. Ook bij impactie speelt de relaxatietijd een belangrijke rol. Voor verschillende deeltjes zijn depositieprocessen daarom gelijk als ρd^2 voor de deeltjes gelijk is. Ofwel, als het Stokesgetal voor verschillende deeltjes gelijk is, gedragen ze zich gelijkwaardig wat betreft depositie. Voor niet-bolvormige deeltjes wordt bovendien een dynamische vormfactor χ gedefinieerd, die de verhouding aangeeft tussen de werkelijke luchtweerstand van het onregelmatige deeltje en de luchtweerstand die het zou

hebben als het perfect bolvormig zou zijn. Voor bolvormige deeltjes is dus $\chi=1$, voor alle andere deeltjes is $\chi>1$. Op basis hiervan wordt de aerodynamische diameter d_a gegeven door de volgende uitdrukking:

$$d_a = d_g \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0 \chi}} \quad 6)$$

Hierin is d_g de geometrische diameter van het onregelmatige gevormde deeltje: dit is de diameter van een bolvormig deeltje met hetzelfde volume als het werkelijke deeltje.

Deeltjes van verschillende samenstelling en vorm gedragen zich wat betreft depositieprocessen als sedimentatie en impactie hetzelfde wanneer hun aerodynamische diameters gelijk zijn. Door deze bepaling worden verschillen in stofdeeltjes gereduceerd tot verschillen in aerodynamische diameter. Aangezien de dichtheid onder het wortelteken staat, is de aerodynamische diameter niet erg gevoelig voor verschillen in dichtheid. Bolvormige deeltjes ($\chi=1$) met een dichtheid van $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ hebben een aerodynamische diameter die ca. 29% kleiner is dan de werkelijke diameter. Evenzo hebben bolvormige deeltjes met een dichtheid van $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ een aerodynamische diameter die ca. 22% groter is (Figuur 4). Bijna alle deeltjes van natuurlijke oorsprong hebben een dichtheid van 1 g.cm^{-3} of groter (MacCrone & Delly 1973).



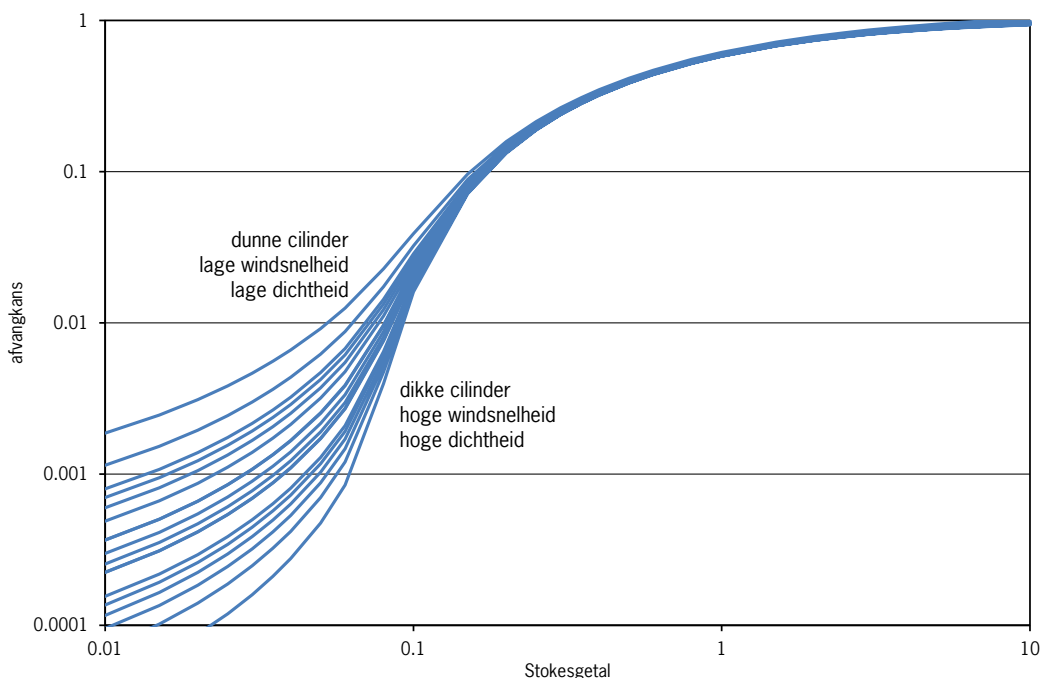
Figuur 4. Effect van de geometrische diameter en de dichtheid op de aerodynamische diameter (dichtheid blauwe lijn: $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$; rode lijn 1 g.cm^{-3} en groene lijn $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$; gestippelde lijn: 1:1).

2.8 Het effect van dichtheid en aerodynamische diameter op de afvangkans

De afvangkans voor stofdeeltjes door een object is goed te beschrijven met curves als getoond in Figuur 3. Het Stokesgetal en het type object zijn dan maatgevend voor de afvangkans. Eerder werd al genoemd dat deeltjes met dezelfde aerodynamische diameter hetzelfde Stokesgetal hebben. Op basis van berekeningen van de baan van deeltjes nabij een cilindrisch object is dit te verifiëren. Deze 'particle tracking' simulaties tonen inderdaad aan dat voor een groot aantal situaties de afvangkans alleen een functie van het Stokesgetal zijn (Figuur 5). Let op de logaritmische schalen in die figuur. Voor Stokesgetallen $St \sim 0,15$ is de afvangkans ca. 10%; voor grotere Stokesgetallen zijn de afvangkans nagenoeg onafhankelijk van cilinderdiameter, windsnelheid of dichtheid van de deeltjes. Echter, voor kleinere Stokesgetallen treden er toch verschillen op. Grote verschillen treden op als $St < 0,06$;

de afvangkansen zijn dan weliswaar ook erg klein ($<1\%$). Het blijkt dat de bovenste curves in dat gebied samengaan met dunne cilinders, lage windsnelheden of lage deeltjesdichtheden. In alle gevallen ontstaan de verschillen door 'interceptie' (zie paragraaf 2.2), ofwel deeltjes die net (niet) langs het oppervlak van het object schampen.

Dat deze effecten mogelijk toch een rol kunnen spelen, wordt verduidelijkt in Figuur 6, waar een deel van de berekende curves op lineaire schaal is getoond. Alleen de afvangkansen van deeltjes tot $10\ \mu\text{m}$ door $1\ \text{mm}$ cilinders is getoond, bij verschillende windsnelheden en deeltjesdichtheden. Situaties met dezelfde windsnelheid verschillen een klein beetje wanneer de dichtheid van de deeltjes verschilt: een lagere dichtheid geeft een iets hogere afvangkans. Deeltjes met lagere dichtheid hebben, bij gelijke aerodynamische diameter, een grotere geometrische diameter, zodat interceptie vaker zal optreden. Met name als de windsnelheid laag is, kunnen de *relatieve* verschillen in afvangkansen bij verschillen in dichtheid opvallend groot zijn. In *absolute* zin zijn de verschillen in afvangkans echter vrij klein; in de getoonde voorbeeldcurves zijn de verschillen in het ongunstige geval hooguit $0,5\%$.

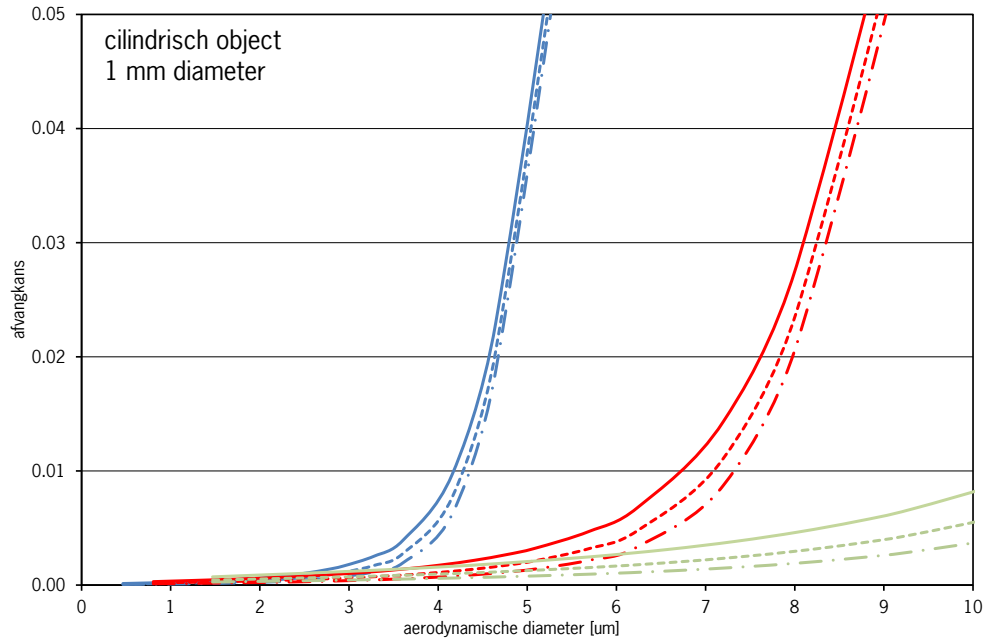


Figuur 5. Afvangkansen voor ronde stofdeeltjes op een cilindrisch object als functie van het Stokesgetal; voor verschillende cilinderdiameters, windsnelheden en deeltjesdichtheden.

De effecten van de aerodynamische diameter op de afvangkans zijn eveneens uit Figuur 6 af te lezen. Bij een windsnelheid van $3\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ neemt de afvangkans in absolute zin met enkele procenten toe bij een toename van de aerodynamische diameter van 4 naar $5\ \mu\text{m}$. Deze toename is kleiner bij een lagere windsnelheid: bij een windsnelheid van $1\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ neemt de afvangkans slechts toe met ongeveer 1% bij een toename van de aerodynamische diameter van 6 naar $7\ \mu\text{m}$.

In de praktijk zullen verschillen ten gevolge van dichtheidsverschillen geringer zijn dan de verschillen ten gevolge van een grotere diameter, ook om de volgende reden. De windsnelheid zal bij de voorste bomen van een bos nog betrekkelijk hoog zijn, met relatief hoge afvangkansen die nog weinig gevoelig zijn voor deeltjesdichtheid maar wel voor de deeltjesgrootte. De eerste rij bomen vangt de meeste deeltjes af (Pronk *et al.*, 2012). Dieper het gewas in, zal de windsnelheid afnemen, waarbij het effect van dichtheid op de afvangkansen een iets grotere rol zal spelen en de effecten ten gevolge van de diameter afneemt. Echter, de bijdrage aan de totale afvangst door het bos is dan relatief gering. De totale afvangst van stof in een bos zal daarom weinig gevoelig zijn voor verschillen in dichtheid

van de stofdeeltjes en gevoeliger voor de aerodynamische diameter. Het spectrum van aerodynamische deeltjesgroottes blijft ook dan bepalend voor de afvangst (uiteraard in combinatie met factoren als boomsoort, plantdichtheid, windsnelheid e.d.).



Figuur 6. Afvangkansen voor kleine stofdeeltjes (0 - 10 µm) op een cilindrisch object (1 mm diameter) als functie van aerodynamische diameter; drie windsnelheden (blauw = 3 m.s⁻¹; rood = 1 m.s⁻¹; groen = 0,3 m.s⁻¹) en drie deeltjesdichtheden (doorgetrokken lijn = 0,5 g.cm³; gestippelde lijn = 1 g.cm³; en onderbroken lijn = 2 g.cm³).

3. Toepassen van deze theorie op bekende meetgegevens

Om de afvangst van deeltjes $> 10 \mu\text{m}$ door een groenelement aan te tonen zijn recentelijk veldproeven uitgevoerd (Pronk *et al.*, 2012). Deze veldproeven laten zien dat van deeltjes die een haag invliegen ongeveer 30% van de deeltjes tussen de $4 - 10 \mu\text{m}$ werd afgevangen en 9% van de deeltjes tussen de $3 - 7 \mu\text{m}$ door grove den, en 12% voor deeltjes tussen de $4 - 10 \mu\text{m}$ door haagbeuk. Deze metingen zijn uitgevoerd met een fluorescerende tracer. Een tracer was nodig omdat depositie in beplanting in de orde van grootte van enkele procenten is (Beckett *et al.*, 2000), de tijdspanne voor het verkrijgen van een meetbare depositie daardoor erg lang wordt en omdat het bepalen van fijnstof op beplanting technisch ingewikkeld is (Freer Smith *et al.*, 2005). Deze studie geeft daardoor inzicht in de afvangkans van deeltjes met een bijbehorende, werkelijke diameter en dichtheid.

De norm voor fijnstofdeeltjes in de lucht is een gewichtsnorm per volume ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), vastgesteld voor deeltjes tot een aerodynamische diameter van $10 \mu\text{m}$, PM_{10} . Zoals in paragraaf 2.7 is beschreven, worden daarvoor alle in de lucht aanwezige deeltjes gestandaardiseerd naar een aerodynamische diameter met vergelijking (6). Een vertaling van de meetgegevens naar PM_{10} door standaardisatie naar een aerodynamische diameter, is nodig voor de interpretatie van deze meetresultaten naar PM_{10} . De dichtheid van de fluorescerende tracer is $1,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

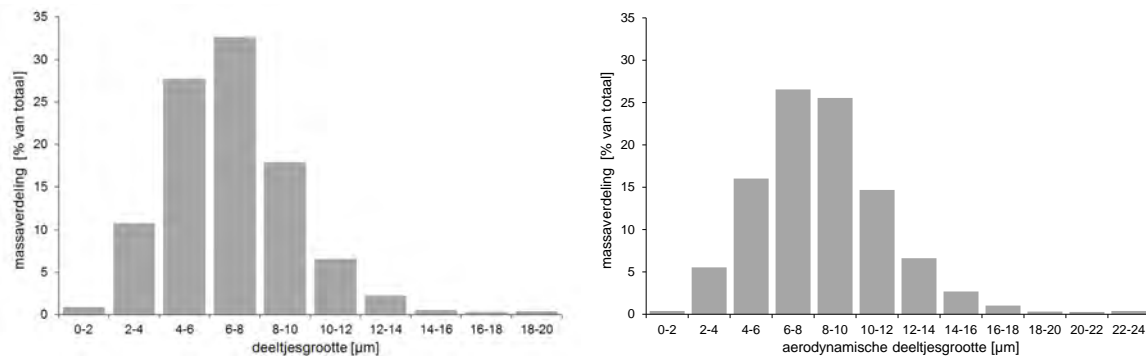
(<http://www.chemspider.com/Chemical-Structure.67977.html>), waardoor de aerodynamische diameter van de deeltjesverdeling groter wordt dan de geometrische diameter (Tabel 1).

Tabel 1. Concentratie BSF en de gemiddelde deeltjesgrootte en spreiding bij opgedroogde deeltjes (Pronk *et al.*, 2012). Werkelijke groottes en overeenkomstige aerodynamische groottes.

Concentratie BSF [g/L]	Werkelijke deeltjesgrootte		Aerodynamische deeltjesgrootte	
	Gemiddelde grootte [μm]	Range van groottes ¹ [μm]	Gemiddelde grootte [μm]	Range van groottes [μm]
1,3	6,6	3,8 – 10,0	8,1	4,7 – 12,3
0,4	4,5	2,6 – 6,8	5,5	3,2 – 8,3
0,1	2,8	1,6 – 4,3	3,4	2,0 – 5,2

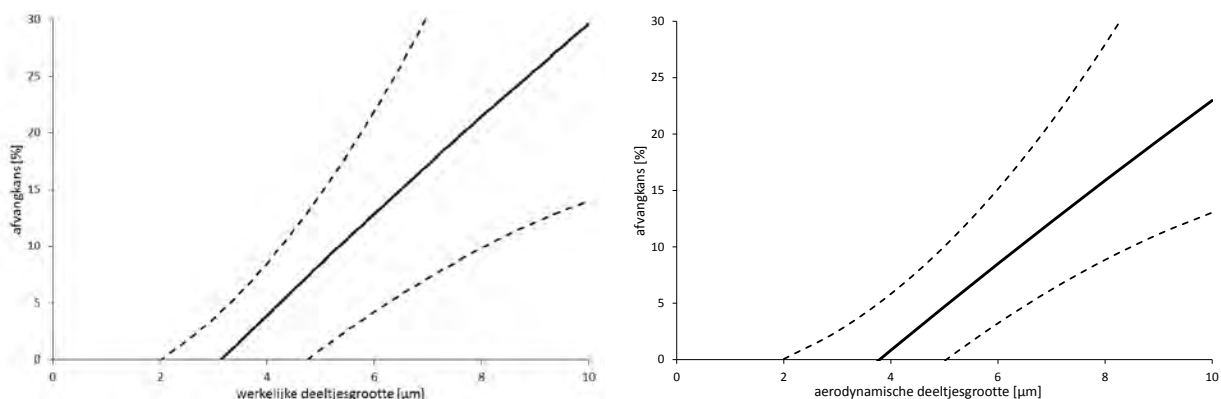
¹ omvat 80% van totale massa van de gehele verdeling.

Het aanpassen van de deeltjesgrootte heeft eveneens een effect op de verdeling van de deeltjes die de haag in zijn gewaaid (Figuur 7). Bij een BSF concentratie van $1,3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ is de massa van deeltjes met een werkelijke diameter $> 10 \mu\text{m}$ ongeveer 10% terwijl dit bij een aerodynamische diameter is toegenomen tot ongeveer 25%.



Figuur 7. Grootteverdeling van fijnstofdeeltjes zoals geproduceerd ten behoeve van de experimenten bij een beginconcentratie van de tracer van $1,3 \text{ g.L}^{-1}$ met een werkelijke diameter (links, Pronk 2012) en met een aerodynamische diameter (rechts).

De berekende kans op botsen (afvangkans) van de deeltjes omgerekend naar de aerodynamische diameter, verschilt eveneens van de afvangkans gebaseerd op de geometrische diameter (Figuur 8). Hoewel de aanpassing beperkt is, kan nu experimenteel niet worden aangetoond dat deeltjes kleiner dan $3,8 \mu\text{m}$ door een groenelement kunnen worden afgevangen.



Figuur 8. Berekende relatie tussen deeltjesgrootte en afvangkans voor grove den, (links) geometrische diameter (Pronk et al., 2012); (rechts) aerodynamische diameter.

4. Discussie

4.1 De invloed van eigenschappen van deeltjes op de depositie

Zoals uit hoofdstuk 2 naar voren komt hangt de afvangkans van fijnstof door een cilindrisch oppervlak af van de dichtheid van de deeltjes en de diameter van de deeltjes. De dichtheid van de deeltjes heeft een beperkt effect op de afvangkans terwijl het effect van de diameter groter is, vooral bij hogere windsnelheden (Figuur 6).

Voor de depositie van fijnstof uit de veehouderij zijn vooral de afvangkans van de deeltjes van 3 tot 10 μm belangrijk (Aarnink *et al.*, 2011). Voor deze deeltjesgrootte is impactie het dominante proces (Figuur 2) terwijl ook sedimentatie bij windstille situaties een bijdrage levert. Bij sedimentatie wordt aan de voorwaarden voor een voldoende klein Reynoldsgetal voldaan (paragraaf 2.4) zodat turbulentie geen rol speelt. Voor impactie is het Reynoldsgetal al bij relatief lage windsnelheden groter dan de grenswaarde van 0,25, zodat turbulentie een rol gaat spelen. Bijvoorbeeld, voor een cilindrisch botsingsobject met een diameter van 1 mm bij een windsnelheid van $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wordt het Reynoldsgetal ongeveer 66. Er ontstaat turbulentie in de vorm van wervels aan de lijszijde. De relaxatietijd is dan lager dan op grond van vergelijking (1) kan worden berekend, wat uiteindelijk resulteert in een iets lager afvangkans dan wanneer er geen turbulentie zou zijn. De curves van Figuur 3 blijven overigens geldig.

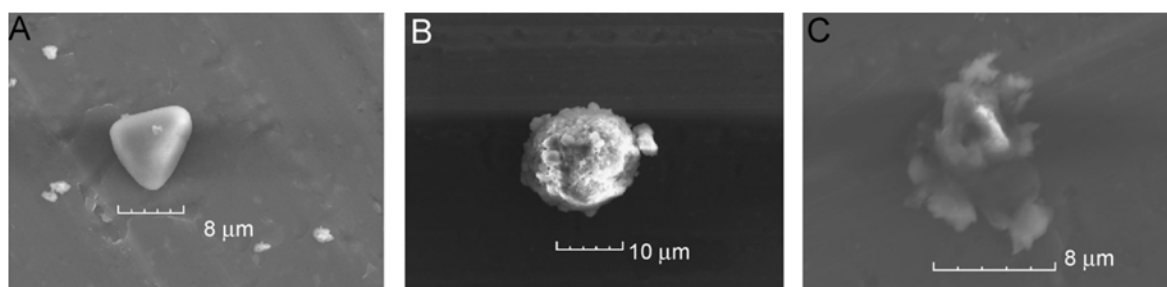
Uit deze studie komt naar voren dat het Stokesgetal een goede maat is voor de afvangkans en dat de dichtheid van de deeltjes geen invloed heeft op deze afvangkans. Alleen bij kleine waarden van het Stokesgetal is er geen eenduidige relatie met de afvangkans. Andere factoren spelen dan ook een rol, zoals de verhouding van deeltjesgrootte tot objectgrootte en de dichtheid van het deeltje. Een kleine waarde van het Stokesgetal correspondeert met een lage windsnelheid of een groot botsingsobject. Bij een zekere windsnelheid is de afvangkans kleiner voor deeltjes met een grotere dichtheid omdat deze een geometrische diameter hebben die naar verhouding kleiner is (Figuur 4); deze deeltjes scheren daardoor iets makkelijker langst het botsingsoppervlak zonder het te raken.

De afvangkans van alle deeltjes samen bepaalt de uiteindelijke depositie. Andere factoren hebben eveneens invloed op de afvangkans, zoals vorm en oppervlaktestructuur van het botsingsobject en omgevingsfactoren zoals de windsnelheid. De vorm van het botsingsoppervlak en de windsnelheid zijn zijdelings aan de orde gekomen in hoofdstuk 2, waarbij vooral de windsnelheid een groot effect heeft op de afvangkans (Figuur 6). Een andere omgevingsfactor, de relatieve luchtvochtigheid (RV) heeft op zijn beurt invloed op de diameter van de deeltjes en daarmee op de afvangkans. De diameter van droge deeltjes kan sterk afwijken van de diameter van deze deeltjes in de (vochtige) buitenlucht (QUARG 1996). De luchtvochtigheid en de mate waarin deeltjes vocht uit de lucht kunnen aantrekken (hygroscopisch zijn), heeft daardoor invloed op de diameter van de deeltjes en daarmee op de depositie.

Fijnstof (2,5 tot 10 μm) in een kippenstal bestaat voornamelijk uit rondvliegende mestdeeltjes, 70 - 96% (Aarnink *et al.*, 2011) met een dichtheid van $1,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (MacCrone & Delly 1973). Bij ventileren worden deze deeltjes in de buitenlucht gebracht. Het is niet bekend of de deeltjes uit een kippenstal daarna groeien dan wel krimpen doordat de omstandigheden in de buitenlucht anders zijn dan in de stal. In het algemeen is de relatieve vochtigheid van de stallucht 60 tot 70%. Ventileren wordt zodanig geregeld dat de temperatuur in de stal ongeveer 20°C blijft en het CO_2 -gehalte $< 3000 \text{ ppm}$. Aannemende dat de temperatuur van de ventilatielucht 20°C is en een relatieve luchtvochtigheid heeft van 70%, is voornamelijk niet bekend of fijnstofdeeltjes groeien dan wel krimpen als ze in de buitenlucht komen met bekende temperatuur en vochtigheid. Het proces om met de buitenlucht in evenwicht te komen is relatief kort, gewoonlijk minder dan 1 seconde (Holterman 2003).

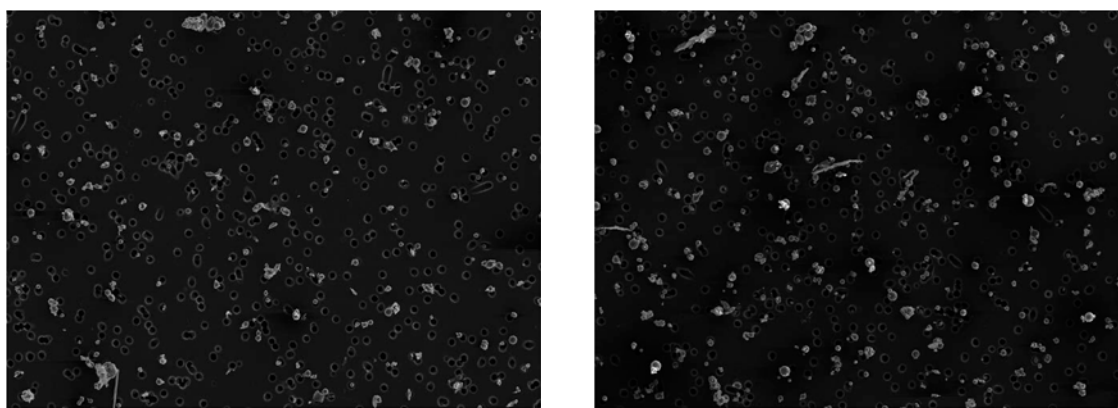
Van fijnstof uit rundveehouderijbedrijven is vastgesteld hoe hygroscopisch verschillende deeltjes zijn (Hiranuma *et al.*, 2008). Fijnstofdeeltjes zijn in deze studie ingedeeld naar aerodynamische diameter (> 10 ; $2,5 - 10$; $< 2,5 \mu\text{m}$) en naar vorm, A een ronde, gladde vorm, B amorphe vorm en C een vlokkerige vorm, een samenklontering van amorphe deeltjes (Figuur 9). Van deze deeltjesvormen is voor iedere deeltjesgrootte de hygroscopische groeifactor bepaald (diameter deeltje bij gegeven relatieve vochtigheid/diameter van droge deeltje). Deeltjes $< 2,5 \mu\text{m}$ hadden allemaal een lage groeifactor, maximaal 1,2 bij 94% relatieve luchtvochtigheid (RV). De groeifactor van deeltjes met de

vormen B en C in de grootteklassen > 10 en $2,5 - 10 \mu\text{m}$ was eveneens beperkt, maximaal 1,2. De groefactor van deeltjes met vorm A in die grootteklassen was echter aanzienlijk groter, tot maximaal 2 bij 94% RV voor alle deeltjesgrootte klassen. De groei van dit deeltje start bij een RV van 75 - 80%.



Figuur 9. Beelden van representatieve deeltjes van de drie waargenomen vormen A, B en C (overgenomen van Hiranuma et al., 2008).

Aarnink *et al.* (2011) presenteren in hun studie beelden van fijnstofdeeltjes van verschillende stalsystemen en beschrijven dat de 'ronde mestdeeltjes' afkomstig van leghennenstallen goed zichtbaar zijn (Figuur 10). Aannemende dat deze mestdeeltjes behoren tot deeltjesvorm A, zou dit betekenen dat deeltjes $< 2,5 \mu\text{m}$ bij het uittreden uit de stal in ieder geval niet krimpen en bij een RV > 75 á 80% kunnen groeien tot 2 maal de diameter die het deeltje had bij het verlaten van de stal.



Figuur 10. Voorbeelden van foto's gemaakt met de elektronenmicroscoop van stofdeeltjes in de range van $2,5$ tot $10 \mu\text{m}$ op een polycarbonaat filter (de vele kleine rondjes zijn gaatjes in het filter met een diameter van $5 \mu\text{m}$). (links) Ronde deeltjes van een schaarrestal voor leghennen; (rechts) Ronde deeltjes van een volièrestal voor leghennen. De schaal die linksonder elke foto is aangegeven is $100 \mu\text{m}$ (overgenomen van Aarnink et al., 2011).

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat fijnstof uit de ventilator van een kippenstal zeer waarschijnlijk niet zal krimpen, omdat deze deeltjes bij het verlaten van de stal al relatief droog zijn. Als de buitenlucht een RV heeft van meer dan 80% is het waarschijnlijk dat de deeltjes groeien tot maximaal twee maal de oorspronkelijke deeltjesgrootte. Doordat impactie sterk afhankelijk is van de diameter van de deeltjes neemt de afvangkans toe bij vochtig weer. De dichtheid van deeltjes die groeien door opname van vocht zal lager zijn dan die van droge deeltjes. De aerodynamische diameter zal daardoor dichterbij de geometrische diameter komen te liggen. De afvangkans zal daarom minder sterk toenemen dan alleen op basis van de toename in grootte verondersteld zou kunnen worden.

4.2 Verbetering luchtkwaliteit ventilatielucht veehouderij door groenelementen

De depositie van fijnstof op beplanting in een groenelement levert een belangrijke bijdrage aan het verlagen van de concentraties in de lucht. In potentie deponeren ongeveer 25% van de deeltjes met een aerodynamische diameter van 10 μm (Figuur 8). Depositie van het stof in het groenelement is een belangrijke maar niet de enige factor die bepaalt hoe succesvol een maatregel als een groenelement is voor het reduceren van de concentratie PM_{10} . Een andere belangrijke factor is: hoeveel van de emissie komt in het groenelement aan om te kunnen deponeren? Om de emissies uit de ventilatoren zoveel mogelijk in een groenelement te vangen, zijn diverse configuraties ontwikkeld en economisch doorgerekend (Pronk *et al.*, 2013). Een voldoende hoog hoefijzervormig groenelement zal bij alle windrichtingen de emissie uit de ventilator invangen. Hoe de emissie zich verspreidt via de impuls die het meekrijgt van de ventilator, is niet bekend. In het vrije veld kwam ruwweg de helft van de emissie uit kleine ventilatoren geplaatst op 1,5 m hoog en na 30 m te hebben afgelegd, bij de 2 m hoge bomenrij aan (Pronk *et al.*, 2012). De impuls van die ventilatoren was echter klein ten opzichte van de impuls van de ventilatoren van een stal (Winkel *et al.*, 2009). Als alle emissie door een groenelement stroomt, blijft maximaal 25% in het groenelement achter. Stroomt slechts een gedeelte van de emissie door het groenelement dan blijft maximaal 25% van de ingestroomde emissie achter. De vraag hoeveel van de emissies daadwerkelijk een groenelement binnenstroomt is vooralsnog niet te beantwoorden.

5. Conclusies

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

- Impactie van deeltjes is sterk afhankelijk van de diameter en alleen bij kleine Stokesgetallen ($<0,06$) speelt de dichtheid van de deeltjes ook een rol.
- De omrekening van de geometrische diameter van kunstmatig fijnstof naar de aerodynamische diameter voor de berekening van de afvangkans van PM_{10} laat zien dat PM_{10} tot maximaal 25% wordt afgevangen door een haag van grove den (*Pinus sylvestris*).
- Fijnstofdeeltjes uit kippenstallen krimpen waarschijnlijk niet als de relatieve luchtvochtigheid in de buitenlucht lager is dan die in de stal.
- Fijnstofdeeltjes uit kippenstallen groeien waarschijnlijk als de relatieve luchtvochtigheid in de buitenlucht groter is dan 75 à 80% tot maximaal twee maal de oorspronkelijke diameter.
- De meetresultaten met de kunstmatige, droge fijnstofdeeltjes geven een ondergrens aan van de depositie die verwacht mag worden in een groenelement.
- Depositie is een belangrijke maar niet de enige factor die bepaalt welke bijdrage een groenelement heeft bij het verbeteren van de luchtkwaliteit rondom stallen.

Referenties

- Aarnink, A.J.A., M. Cambra-López, H.T.L. Lai & N.W.M. Ogink, 2011.
Deeltjesgrootteverdeling en bronnen van stof in stallen: samenvattende rapportage. 1570-8616, Wageningen UR Livestock Research, Lelystad, 22 p pp.
- Beckett, K.P., P. Freer Smith & G. Taylor, 2000.
Effective tree species for local air-quality management. *Journal of Arboriculture* 26, 12-19.
- Davidson, C.I. & Y.L. Wu, 1990.
Dry deposition of particles and vapors. // *Acid precipitation*, Eds S.E. Lindberg, A.L. Page & S.A. Norton. pp. 103-216. Springer-Verlag, New York.
- Freer Smith, P.H., K.P. Beckett & G. Taylor, 2005.
Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* X *trichocarpa* 'Beaupre', *Pinus nigra* and *X Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. *Environmental Pollution* 133, 157-167.
- Hiranuma, N., S.D. Brooks, B.W. Auvermann & R. Littleton, 2008.
Using environmental scanning electron microscopy to determine the hygroscopic properties of agricultural aerosols. *Atmospheric Environment* 42, 1983-1994.
- Holterman, H.J., 2003.
Kinetics and evaporation of water drops in air. IMAG, Wageningen.
- MacCrone, W.C. & J.G. Delly, 1973.
The particle analyst's handbook. // *The particle atlas: an encyclopedia of techniques for small particle identification*. pp. 799-1118. Ann Arbor Science Publisher, Inc., Ann Arbor.
- May, K.R. & R. Clifford, 1967.
The impaction of aerosol particles on cylinders, spheres, ribbons and discs. *Annals of Occupational Hygiene* 10, 83-95.
- Pronk, A.A., N. Ogink, H.J. Holterman, P. Hofschreuder & I. Vermeij, 2013.
Effecten van groenelementen op de luchtkwaliteit: samenvattende rapportage en perspectieven toepassing groenelementen voor het verbeteren van de lokale luchtkwaliteit rondom stallen. Rapportnummer 493, Plant Research International, Business Unit Agrosysteemkunde, Wageningen, 42 pp.
- Pronk, A.A., H.J. Holterman, P. Hofschreuder, E. Lovink, J.P.M. Ploegaert & W. De Visser, 2012.
Onderzoek naar de interceptie van fijnstof door opgaande gewassen, Plant Research International, Wageningen.
- QUARG, 1996.
Third Report to the Department of the Environment. Airborne particulate matter in the United Kingdom. HMSO, London. 176 p.
- Raupach, M.R., P.R. Briggs, N. Ahmad & V.E. Edge, 2001.
Endosulfan transport: II. Modeling airborne dispersal and deposition by spray and vapor. *Journal of Environmental Quality* 30, 729-740.
- Winkel, A., J. Mosquera, R.K. Kwikkel, F.A. Gerrits, N.W.M. Ogink & A.J.A. Aarnink, 2009.
Fijnstofemissie uit stallen: vleeskuikens = Dust emission from animal houses: broilers. Rapportnummer 275, Wageningen UR Livestock Research, Lelystad, 23 pp.

