



# Onderzoek naar de interceptie van fijnstof door opgaande gewassen

Annette Pronk, Henk Jan Holterman, Peter Hofschreuder, Eef Lovink,  
Johan Ploegaert & Willem de Visser







# Onderzoek naar de interceptie van fijnstof door opgaande gewassen

Annette Pronk<sup>1</sup>, Henk Jan Holterman<sup>1</sup>, Peter Hofschreuder<sup>2</sup>, Eef Lovink<sup>2</sup>,  
Johan Ploegaert<sup>2</sup> & Willem de Visser<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Plant Research International

<sup>2</sup> Livestock Research

© 2012 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, Business Unit 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 05 29  
Fax : 0317 – 41 80 94  
E-mail : [info.pri@wur.nl](mailto:info.pri@wur.nl)  
Internet : [www.pri.wur.nl](http://www.pri.wur.nl)

# Inhoudsopgave

|                                                                  | pagina |
|------------------------------------------------------------------|--------|
| Voorwoord                                                        | 1      |
| Samenvatting                                                     | 3      |
| Summary                                                          | 7      |
| 1. Inleiding                                                     | 11     |
| 2. Verkenning van de proeftechnische mogelijkheden               | 13     |
| 2.1 Het maken van fijnstofdeeltjes                               | 14     |
| 2.2 Van puntbron naar lijnbron                                   | 15     |
| 2.3 Bespuitingsduur en detectiegrens                             | 17     |
| 2.4 De hoeveelheid herwinbare tracer van gewassen en stoffilters | 18     |
| 2.5 Bemonstering van deeltjes in de lucht                        | 19     |
| 2.6 De geometrie van de veldproef                                | 19     |
| 2.7 Relatie tussen deeltjesgrootte en afvangkans                 | 20     |
| 2.8 Conclusie en aanbevelingen                                   | 20     |
| 2.8.1 Conclusies                                                 | 20     |
| 2.8.2 Aanbevelingen                                              | 21     |
| 3. Materiaal en methoden veldexperimenten                        | 23     |
| 3.1 De layout van de proef                                       | 23     |
| 3.2 Weersgegevens                                                | 25     |
| 3.3 Bemonstering                                                 | 27     |
| 3.3.1 Filters                                                    | 28     |
| 3.3.2 Bodem                                                      | 28     |
| 3.3.3 Gewas                                                      | 28     |
| 3.3.4 Overig                                                     | 29     |
| 3.4 Balansberekeningen                                           | 29     |
| 4. Resultaten                                                    | 31     |
| 4.1 De windprofielen en de windrichting                          | 31     |
| 4.2 De veldexperimenten                                          | 33     |
| 4.3 Resultaten van de verschillende balansposten                 | 34     |
| 4.3.1 Experimenten zonder bomen                                  | 34     |
| 4.3.2 Depositie op de filters                                    | 36     |
| 4.3.3 Depositie op de bodem                                      | 37     |
| 4.3.4 Depositie op het gewas                                     | 38     |
| 4.3.5 Massabalans                                                | 40     |
| 4.3.6 Opstuwning                                                 | 44     |
| 4.3.7 Controlemetingen                                           | 45     |
| 4.4 De interceptie van fijnstof door grove den en haagbeuk       | 45     |

|               |                                                                  |       |
|---------------|------------------------------------------------------------------|-------|
| 5.            | Discussie en conclusies                                          | 47    |
| 5.1           | De balansen                                                      | 47    |
| 5.2           | De afvang efficiëntie                                            | 47    |
| 5.3           | Het effect van een bomenhaag op de concentratie fijnstofdeeltjes | 48    |
| 5.4           | Extrapolatie van de resultaten naar de veehouderij               | 48    |
| 5.5           | Conclusies                                                       | 49    |
| 5.6           | Aanbevelingen                                                    | 49    |
|               | Literatuur                                                       | 51    |
| Bijlage I.    | Verspreiding van een puntbron volgens een Gaussisch pluimmodel   | 5 pp. |
| Bijlage II.   | Bemonstering van deeltjes in de lucht                            | 2 pp. |
| Bijlage III.  | Beginconcentratie en deeltjesgrootteverdeling                    | 2 pp. |
| Bijlage IV.   | Berekening van de massabalans                                    | 3 pp. |
| Bijlage V.    | Bepaling van afvang efficiëntie uit depositiemetingen            | 5 pp. |
| Bijlage VI.   | Opstuwing van lucht over het gewas                               | 1 p.  |
| Bijlage VII.  | Effect van LAD op afvangst                                       | 1 p.  |
| Bijlage VIII. | Windsnelheidsprofielen                                           | 5 pp. |







# 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 door groenelementen gestart, waarbij de bundeling van kennis van Livestock Research en Plant Research International en de intensieve samenwerking nodig was om dit onderzoek te kunnen uitvoeren. Het onderzoek kende een verkennende fase waarin de mogelijkheden onderzocht zijn om met veldexperimenten de interceptie door groenelementen aan te tonen. Na deze proeftechnische verkenning zijn de veldexperimenten gestart in het najaar van 2010. Omdat de nazomer onvoldoende mooi-weer-dagen had voor het uitvoeren van de experimenten, heeft dit een vervolg gekregen tot de zomer van 2011. Ook in het voorjaar hebben de onderzoekers veel geduld moeten bewaren om op de spaarzame mooi-weer-dagen de experimenten kunnen uitvoeren. Dit heeft aan alle medewerkers hoge eisen gesteld. Vooral de meetploeg bestaande uit Willem de Visser, Pleun van Velde, Bert Meurs, Hein Stallinga, Jean Marie Michielsen en Egbert Nagelhout hebben blijk gegeven van een grote flexibiliteit om al het veldwerk mogelijk te maken. Door de inzet van Jacques Davies en Ben Rutgers zijn alle metingen in het laboratorium vlot verlopen.

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het ministerie van Economische zaken, Landbouw en Innovatie in het kader van het 'Plan van aanpak bedrijfsoplossingen voor fijnstofreductie in de pluimveehouderij' en de Provincie Gelderland.

Annette Pronk

Projectleider van het project interceptie fijnstof door opgaande gewassen.

Plant Research International, Wageningen UR



# Samenvatting

Om te kunnen voldoen aan de Europese norm voor fijnstofconcentraties in de buitenlucht dienen in Nederland maatregelen te worden doorgevoerd die de uitstoot van fijnstof uit belangrijke bronnen terugdringen. De veehouderij en in het bijzonder de pluimveehouderij zijn een belangrijke bron van fijnstofdeeltjes, deeltjes kleiner dan 10 micrometer. Via ventilatoren komt fijnstof vanuit stallen in de buitenlucht, waarbij de normen voor buitenluchtconcentraties overschreden (kunnen) worden. Er bestaat daarom behoefte aan technische maatregelen waarmee de pluimveehouderij de concentratie fijnstof in de buitenlucht kan verminderen.

Een relatief eenvoudige maatregel zou kunnen zijn om een bomenrij langs de stal te plaatsen. Beplanting krijgt veel aandacht als aantrekkelijke en relatief eenvoudige methode om fijnstofconcentratie te verlagen. Daarnaast is het aantrekkelijk voor landschappelijke inpassing van grote stallen en zorgt het voor beschutting tegen wind.

Het is echter onduidelijk hoeveel verlaging van de fijnstofconcentratie aan beplanting mag worden toegeschreven. Vermindering van de fijnstofconcentratie door bijvoorbeeld een bomenrij, is gebaseerd op twee processen, verdunnen en afvangen. Deze kunnen in principe apart beschreven worden maar treden in de praktijk tegelijkertijd op. Verdunning treedt op als een bomenrij de wind omhoog stuwt. De met fijnstof vervuilde lucht mengt hierdoor met schonere lucht uit hogere luchtlagen en de concentratie neemt dientengevolge/daardoor af. Een deel van de wind waait door de bomenrij heen. De fijnstof in die lucht botst tegen bladeren, naalden of takken en wordt daardoor permanent uit de lucht verwijderd. Als gevolg daarvan neemt de concentratie eveneens af. In dit onderzoek worden beide processen experimenteel bestudeerd. Het doel van deze studie is de afname van de concentratie fijnstof door een bomenrij vast te stellen bij verschillende deeltjesgroottes en vegetatietypes.

In veldexperimenten is daartoe de lucht voorzien van kunstmatig fijnstof. Op een afstand van 30 m voor de bomen zijn vernevelaars geplaatst die kleine druppeltjes in de lucht brachten. Deze druppeltjes bevatten een bekende hoeveelheid kleurstof en zweven met de wind richting de bomenrij. Daar aangekomen, is het water in de druppel verdampt en zijn er alleen droge fijnstofdeeltjes over. Vervolgens is vastgesteld:

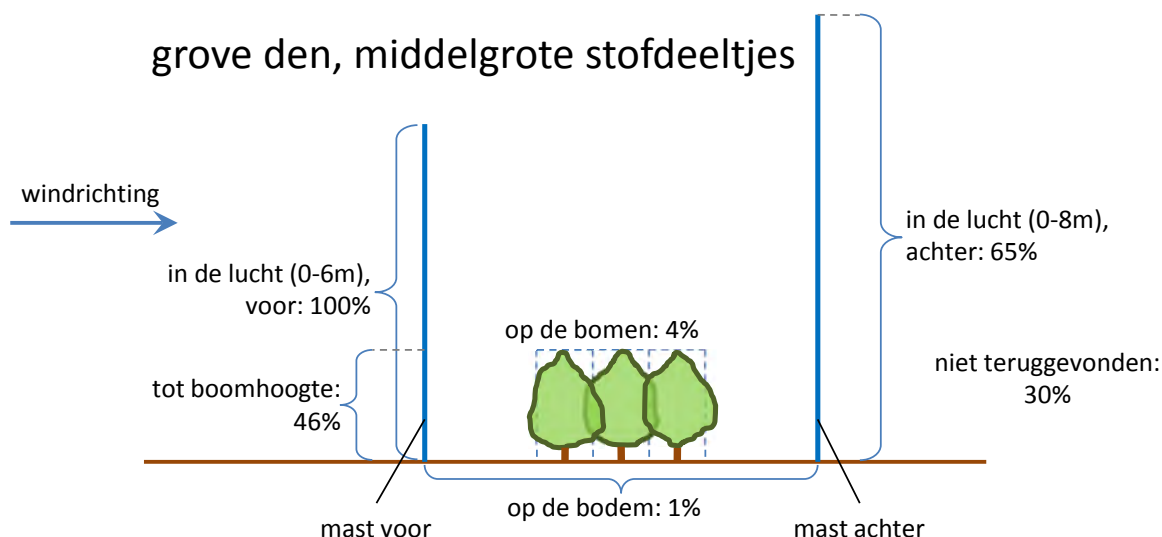
- Hoeveel kunstmatig fijnstof bij de bomenrij aankomt,
- Hoeveel door de bomen is afgevangen,
- Hoeveel op de grond terecht is gekomen,
- Hoeveel door de bomenrij is opgestuwd (verdund) en
- Hoeveel achter de bomenrij nog over is.

Ter controle zijn een aantal experimenten zonder bomenrij uitgevoerd.

Twee soorten bomen zijn onderzocht, de naaldboom grove den (*Pinus sylvestris*) en de loofboom haagbeuk (*Carpinus betulus*). Omdat grotere deeltjes makkelijker botsen en plakken dan kleinere deeltjes, is in dit onderzoek gewerkt met verschillende deeltjesgrootten. Bij de grove den zijn drie verschillende deeltjesgrootten onderzocht: relatief grote (4-10  $\mu\text{m}$ ), middelgrote (3-7  $\mu\text{m}$ ) en kleine deeltjes (2-4  $\mu\text{m}$ ). Bij de haagbeuk zijn alleen de grote deeltjes onderzocht.

Als voorbeeld van de resultaten is in Figuur 1 de massabalans weergegeven voor middelgrote stofdeeltjes bij een bomenrij van grove den. Uit de Figuur blijkt het volgende:

- Van alle deeltjes die voor de bomenrij aankwamen waaide 46% recht op de bomenrij af, tot de hoogte van de bomenrij. Deze deeltjes konden onderschept worden door de bomen. Een gedeelte hiervan zal overigens over de bomenrij heen waaien doordat de wind wordt opgestuwd en over de bomen heen waait.
- 4% van alle deeltjes bleef op de bomen in de bomenrij achter. Van de deeltjes die recht op de bomenrij afwaaiden, bleef  $4/46 \cdot 100\% = 9\%$  op de bomen achter.
- 1% van alle deeltjes is op de bodem onder de bomen teruggevonden.
- 65% van alle deeltjes is aan de achterzijde van de bomenrij in de lucht teruggevonden.
- 30% van alle deeltjes niet is teruggevonden. Dit is een aanzienlijk verlies van deeltjes en dit verlies is groter dan in de controle-experimenten.



*Figuur 1. Een schematisch overzicht van de vastgestelde deeltjesbalans (nadere toelichting elders in het rapport).*

Het grote verlies kan voor een klein gedeelte verklaard worden doordat de afvangst van deeltjes door de stamdelen van grove den niet zijn gemeten maar geschat op basis van de afvangst van de stamdeeltjes van haagbeuk. De afvangst door de stamdelen kon door technische redenen niet bepaald worden. Deze onderschatting kan echter het grote verlies van 30% niet verklaren. Een andere mogelijke verklaring voor dit grote verlies is, dat de bomenrij de diffusie van de stofwolk naar boven bevordert ten opzichte van de situatie zonder bomen. Een groter gedeelte waait daardoor achter de bomen boven het laatste meetpunt langs de meetmast.

De resultaten van de experimenten met de grote (4-10  $\mu\text{m}$ ) kunstmatige fijnstofdeeltjes geven een te optimistisch beeld van de afvangst van deeltjes door een bomenrij. Tijdens deze experimenten waren de weersomstandigheden niet optimaal en daardoor is een deel van de druppeltjes onvoldoende opgedroogd op het moment dat ze bij de bomenrij arriveerden. Grotere deeltjes (druppeltjes of fijnstofdeeltjes), botsen makkelijker dan kleinere deeltjes, zodat de afvangst groter is. De gebruikte methode stelt hoge eisen aan de weersomstandigheden tijdens de experimenten.

De hoeveelheid afgevangen kleine kunstmatige fijnstofdeeltjes (2-4  $\mu\text{m}$ ) in grove den lag onder de detectiegrens van tracer en kon derhalve niet worden aangetoond.

De experimenten met de bomenrij van haagbeuk met de grotere fijnstofdeeltjes lieten een afvangst door de bomenrij zien van 4% van alle deeltjes, ofwel ongeveer 12% van de deeltjes die recht op de bomenrij afwaaiden.

In de experimenten zonder bomen werd ca. 10% van de fijnstofdeeltjes niet terug gevonden. Dit is een maat voor de onzekerheid van de toegepaste methode.

Op een afstand achter de bomenrij van ongeveer 20 maal de hoogte van de bomenrij is het oorspronkelijke windprofiel zo goed als hersteld. Geconcludeerd kan worden dat de concentratie fijnstofdeeltjes op die afstand lager is dan in een situatie zonder bomenrij. De concentratie op die afstand is minimaal verminderd met het afvangpercentage van de bomen (bijvoorbeeld 4% lager zoals in de situatie van Figuur 1). Immers, dat percentage fijnstof blijft in de bomen achter en is permanent uit de lucht verwijderd. In de praktijk zou de concentratieverlaging groter kunnen zijn, doordat meer turbulente opmenging met schone lucht optreedt doch hierover zijn geen meetresultaten verzameld.

Op basis van deze studie kunnen de volgende conclusies worden getrokken ten aanzien van de afvangst van stofdeeltjes die de bomenrij in worden gevoerd:

- Grove den (de naaldboom) heeft een hogere afvang efficiëntie dan haagbeuk (de loofboom), zowel door een grotere afvangende oppervlakte als intrinsiek door de gunstiger vorm van naalden ten opzichte van bladeren.
- Kleinere fijnstofdeeltjes worden minder efficiënt afgevangen dan grotere fijnstofdeeltjes.
- De afvang efficiëntie van grove den voor middelgrote en grote fijnstofdeeltjes is 9% tot mogelijk meer dan 30% van de massa aan deeltjes die tot een hoogte van de bomenhaag in de lucht aanwezig is.
- De afvang efficiëntie van haagbeuk voor de grote fijnstofdeeltjes is ongeveer 12% van de massa aan deeltjes die tot een hoogte van de bomenhaag in de lucht aanwezig is.
- De massabalans zonder bomen laat een tekort zien van ca. 10%; dit is een maat voor de onzekerheid van de experimentele methode.
- Bij de experimenten met bomen blijkt dat er een tekort is op de massabalans van ca. 25%. Dit is een aanzienlijk verlies van deeltjes die niet uit de balansposten kan worden verklaard en duidelijk groter dan de geschatte experimentele onzekerheid.
- Een schatting van de gevonden resultaten geeft aan dat het plaatsen van een bomenhaag, conform de onderzochte geometrie en in het uitstroombied van stalventilatoren, duurzaam (op grotere afstand achter de haag) de concentratie van fijnstofdeeltjes (4 tot 10  $\mu\text{m}$ ) kan verminderen tot 18% voor grove den en tot 5% voor haagbeuk. Het plaatsen van een dergelijke bomenhaag zou daarbij idealiter op enige afstand van de stal moeten zijn, zodanig dat emissies uit ventilatoren gelijkmatig gemengd in de lucht bij de haag aankomen.



## Summary

In order to comply with the European standards of the Air Quality Directive (1996) for fine particulate matter (PM) in ambient air measures need to be taken in the Netherlands to reduce fine particle emissions of major sources. Livestock houses, especially poultry houses, are important contributors to ambient fine (PM<sub>2.5</sub>) and coarse (PM<sub>2.5</sub> to PM<sub>10</sub>) particulate matter emissions.

A relative simple measure could be to create a green buffer of trees around the emission source, the so called 'vegetative environmental buffers'. Vegetation has been under investigation to improve air quality for some time now and it is also considered an attractive element to improve both rural and urban areas in general and provides shelter of livestock housing to wind. However, with respect to PM<sub>10</sub>, not much information is available on the quantitative effects of these so called vegetative environmental buffers. The effects of such buffers on PM<sub>10</sub> concentrations in the air are governed roughly by two principles. Firstly, the wind direction and wind speed are changed by large obstacles such as shrubs, trees or hedge rows and secondly by deposition of PM<sub>10</sub> on surface areas of plants. Wind enriched with particulate pollution is partly pushed up when it encounters a hedge row and concentrations are diluted by mixing with less polluted air. Depending on the porosity of the hedge row, dust enriched wind also enters the hedge row, followed by a reduction of the wind speed as the hedge row absorbs the wind's momentum. Particulate pollution entering the hedge row is removed by deposition on the leaf surfaces through impaction and interception. Both processes are included in the study.

The aim of this study is to experimentally quantify the effects of two hedge row types and different fine dust distributions on the removal of PM<sub>10</sub>.

To quantify the effect of a hedge row on the concentration fine particles (PM<sub>10</sub>) field experiments were conducted in which droplets were released upwind from a planted hedge row. The droplets contained a tracer and had to be dried to dust of a known diameter range when arrived at the hedge row. A mass balance was put together of which all items around the hedge row were measured:

- The amount of tracer reaching the front of the trees,
- The amount of tracer deposited on the trees,
- The amount of tracer deposited on the soil surface,
- The amount of tracer that is lifted by the hedge row and
- The amount of tracer behind the hedge row.

To validate the mass balance experiments without hedge rows were included.

The experiments involved hedge rows of Scots pine (*Pinus sylvestris*) and European or common hornbeam (*Carpinus betulus*). For Scots pine, three diameter ranges of particles were investigated, large particles (4-10 µm), medium sized particles (3-7 µm) and small particles (2-4 µm) whereas for common hornbeam only the large particles were included. The particle flux was measured up to six meters high in front of the hedge row and up to eight meters high behind the hedge row to include the air stream lifted out of its volume by the mean updraft due to the trees. The balance items included deposition on the trees within the hedge rows and on the soil surface between the masts.

Figure 1 is an example of the results of medium sized particles in Scots pine. It shows that:

- From all particles found up to 6 meter in front of the hedge row (set at 100%) 46% was found at tree height. This part of the emitted particles did blow straight at the hedge row and could deposit on the trees, lifted up or drop to the soil surface.
- Of the percentage of the total particle mass approaching the hedge row, set to 100%, 4% was found on the trees in the hedge row. When this deposition is related to the particle mass heading towards the front of the trees, a larger percentage, approximately 9% ( $4/46 \cdot 100\%$ ) can be accounted as deposited on the trees.
- 1% of the total particle mass approaching the hedge row was found on the soil surface.
- Of the total particle mass approaching the hedge row (100%), 65% was found behind the hedge row.
- All balance items were measured. However, on average 30% of the particle mass was not recovered by one of these. The balance items could not account for this gap which is larger than the uncertainties of the mass balance.

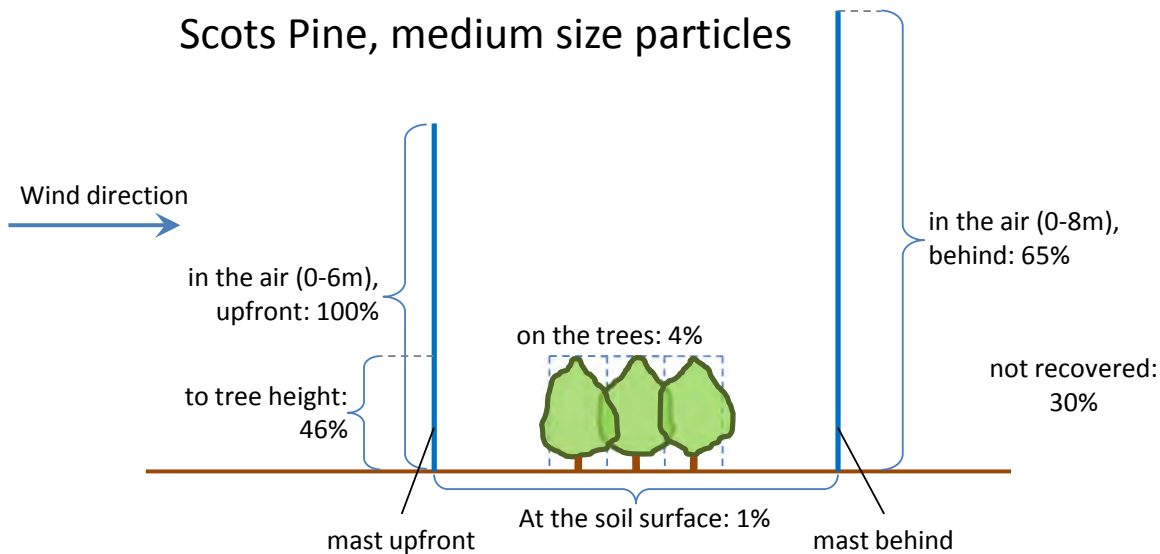


Figure 1. A scheme of the particle balance established in the experiments.

The experiments with the large particles (4-10  $\mu\text{m}$ ) offered to Scots pine resulted in a very high deposition on the trees, explained by the incomplete drying of the droplets. The traveling time of the droplets was too short to dry to dust given the temperature in combination with the relative humidity and wind speed in these experiments. This illustrates the strict demands for the weather conditions to be met for these experiments to be successful.

The deposition of the small particles (2-4  $\mu\text{m}$ ) in Scots pine was below the detection limit and could therefore not be established.

The deposition of large particles (4-10  $\mu\text{m}$ ) in common hornbeam was 4% of the total particle mass, and approximately 12% of the particle mass headed straight to the trees.

In the experiments without a hedge row, approximately 10% of the particle mass was not recovered by one of the balance sheet items. This is within the range of uncertainty that can be expected in this kind of experiments.

At a distance behind the hedge row of approximately 20 times the height of the row, the original wind field has recovered to its original status. As the deposited dust is permanently removed from the air, concentrations at that distance must be lower than in front of the hedge row. As a rough estimate, in practice the concentration is at least reduced by the percentage removed by deposition. Concentration may be even lower because of turbulent mixing with clean air, but this was not investigated in the experiment. For example, a deposition of 4%, as shown in Figure 1, results in a 4% reduced mass concentration behind the hedge row because that amount has been removed from the air permanently.

From this study it is concluded that:

- The deposition of particles on Scots pine was larger than on common hornbeam.
- Smaller particles were captured less efficiently than larger particles.
- Scots pine trapped 9% of the medium particle whereas up to 30% of the large particles were trapped.
- Common hornbeam trapped approximately 5% of the total particle mass, which was about 12% of the particle mass directly heading to the hedge row.
- The mass balance in the experiments without hedge rows showed a shortage of approximately 10%; this is a measure for the uncertainty of the experimental method used.



- The mass balance in all experiments with hedge rows showed a shortage of 25% on average. This is larger than the uncertainty of the experimental method of approximately 10% and so far no explanations were found for this gap.
- A preliminary and rough estimate of the effects of a 'vegetative environmental buffer' as designed in the trial, on the concentrations of particulate, varies between 4 and 18% for respectively particle sizes between 3,5 to 7  $\mu\text{m}$  and 4 to 10  $\mu\text{m}$  when Scots pine is used and is approximately 5% for particle sizes between 4 to 10  $\mu\text{m}$  when common hornbeam is used. When such a buffer is positioned at some distance from the (poultry) housing ventilator so that emissions are homogeneously mixed when approaching the buffer, particulate matter concentrations are substantially reduced at larger distances behind the buffer due to permanent removal of particles.



# 1. Inleiding

## *Achtergrond en probleemstelling*

Om te kunnen voldoen aan de Europese norm voor fijnstofconcentraties in de buitenlucht dienen in Nederland maatregelen te worden doorgevoerd die de uitstoot van fijnstof uit belangrijke bronnen terugdringen. De veehouderij en in het bijzonder de pluimveehouderij, is een belangrijke bron van fijnstofdeeltjes, deeltjes kleiner dan 10 micrometer (PM10) en staat derhalve onder druk om de uitstoot naar de buitenlucht te verminderen. Een herzien plan van aanpak is recentelijk gerepresenteerd (Ogink & Aarnink 2011), waarin concrete, praktijkrijpe bedrijfsoplossingen op hoofdlijnen worden beschreven met de randvoorwaarden.

Een relatief eenvoudige, nog niet praktijkrijpe maatregel zou kunnen zijn om groen in de vorm van een bomenrij of meerdere rijen, een bomenhaag, te plaatsen langs de bron, de stal. Groen krijgt in het beleid veel aandacht als aantrekkelijke en relatief eenvoudige methode om de luchtkwaliteit te verbeteren. Daarnaast is groen aantrekkelijk voor landschappelijke inpassing van grote stallen, zou het eventueel kunnen bijdragen aan het verminderen van de stookkosten doordat gebouwen minder afkoelen door wind, vergroot het de biodiversiteit, legt het CO<sub>2</sub> vast en zou op termijn bij de toenemende houtprijzen wellicht kunnen bijdragen aan het inkomen van de ondernemer.

Het is echter onduidelijk hoeveel verbetering van de luchtkwaliteit, d.w.z. vermindering in concentratie PM10, aan een bomenhaag mag worden toegeschreven. De vermindering van de concentratie fijnstof door een bomenhaag is gebaseerd op twee processen. Ten eerste wordt de wind omhoog gestuwd als deze bij een haag aankomt. Deze opgestuwde wind mengt met meer schonere lucht en daardoor neemt de concentratie af terwijl de totale hoeveelheid in de lucht gebrachte fijnstof niet verandert. Ten tweede blijft een deel van de fijn stofdeeltjes die met de wind de bomenhaag in is gewaaid aan de bomen plakken en wordt daarmee uit de lucht verwijderd (afgevangen), waardoor zowel de concentratie als de totale hoeveelheid stof in de lucht afneemt. Bij dit proces wordt fijnstof permanent uit de lucht verwijderd. De efficiëntie van het afvangen van stofdeeltjes hangt onder andere af van de diametergrootte van de deeltjes en van het type boom. In het algemeen geldt dat hoe kleiner de deeltjes zijn hoe minder efficiënt de afvangst is. Onderzoek in een windtunnel resulteerde in een afvangst van deeltjes van 1,3 µm van minder dan 3% van alle deeltjes die geforceerd door een boom werden gestuurd (Beckett *et al.* 2000b). Uit windtunnelonderzoek blijkt eveneens dat de afvangst toeneemt met ongeveer 5 tot 10% per µm (Little 1977), afhankelijk van de windsnelheid en het gewas. Uit diverse onderzoeken komt eveneens naar voren dat de afvangst van naaldbomen hoger is dan de afvangst door loofbomen (Beckett *et al.* 2000a; Freer Smith *et al.* 2004). De vertaling van windtunnelonderzoek naar situaties in de buitenlucht is echter lastig en deze afvangefficiënties zijn daarom een grove indicaties. Veldonderzoek naar de afvangst van fijnstofdeeltjes is nauwelijks uitgevoerd, vrijwel alle veldonderzoeken zijn uitgevoerd met deeltjes groter dan 10 µm (Bouvet *et al.* 2007; Raupach *et al.* 2001). De massa stofdeeltjes afkomstig uit de veehouderij bestaat voor 3% uit deeltjes tot 2,5 µm, 50% uit deeltjes tussen de 2,5 en 10 µm, en 47% uit deeltjes van 10 tot 32 µm (Aarnink *et al.* 2011). De relatief grote bijdrage van 2,5 tot 10 µm staat centraal in dit onderzoek. Het is niet bekend hoe groot de afvangefficiëntie van deze deeltjes in veldsituaties zal zijn en daarmee is tevens niet bekend hoeveel verbetering van de fijnstofconcentratie mag worden toegeschreven aan een bomenhaag langs of op enige afstand van de bron, de stal.

## Doelstelling:

1. Kwantificeren van de afvangst door een bomenhaag van fijnstofdeeltjes in de lucht, voor verschillende deeltjesgrootten en
2. Kwantificeren van verschillen in afvangst van stofdeeltjes in de lucht door een bomenhaag van twee verschillende gewastypen (naaldbomen en loofbomen).

## *Aanpak*

In deze studie is allereerst een verkenning uitgevoerd van de proeftechnische mogelijkheden om een veldproef aan te leggen waarin de afvangefficiëntie van een bomenhaag kan worden gekwantificeerd. Voor het kwantificeren van de afvangefficiëntie is het noodzakelijk een massabalans op te stellen waarin alle balansposten worden bepaald. De balans heeft de volgende balansposten: de massa van deeltjes die voor de bomenhaag in de lucht aanwezig is tot

een bepaalde hoogte, de massa deeltjes die op de grond terecht komt, de massa deeltjes die in de bomenhaag blijven hangen, en de massa deeltjes in de lucht achter de bomenhaag tot een bepaalde hoogte, rekening houdend met de opstuwning van de lucht met deeltjes, veroorzaakt door de bomenhaag zelf.

Nadat berekend is hoe de proeftechnische opzet van een dergelijke complexe proef eruit moet zien, zijn diverse veldexperimenten uitgevoerd waarin de afvang efficiëntie van drie deeltjesgrootte in de naaldboom grove den en één deeltjesgrootte in de loofboom haagbeuk is bepaald. Met deze veldexperimenten zijn de balansen opgesteld en is de afvang efficiëntie bepaald.

In de discussie wordt op basis van de experimentele resultaten een schatting gemaakt van het effect van een bomenhaag op de fijnstofconcentratie op enige afstand achter die bomenhaag.

## 2. Verkenning van de proeftechnische mogelijkheden

In deze paragraaf wordt beschreven hoe de proefopzet eruit moet zien om de vraagstelling uit de inleiding goed te kunnen beantwoorden. De keuze is gemaakt voor een veldexperiment met twee duidelijk onderscheidbare boomgewassen, de naaldboom grove den (*Pinus sylvestris*) en de loofboom haagbeuk (*Carpinus betulus*) (Figuur 2). In het veld wordt een haag van elk van deze boomtypen aangelegd, d.w.z. meerdere rijen bomen vormen de haag, van 2 meter hoog. Het plan is om bovenwinds druppeltjes met een tracer te verspuiten door middel van een aantal vernevelaars. Bij een windrichting loodrecht op de bomen, waait de wolk van druppeltjes naar de bomenhaag. Gedurende de vlucht van de druppeltjes naar de bomenhaag drogen ze op als het warm en drogend weer is, zodat fijnstof bestaande uit het tracermateriaal overblijft. Hoe snel de druppeltjes opdrogen is in het laboratorium voorafgaande aan de veldproven bepaald (zie Par. 2.1). De concentraties van dit fijnstof worden gemeten in de lucht vlak voor en vlak achter de bomenhaag en als depositie op de bomen en op de grond onder de bomen. Met deze gegevens wordt een massabalans opgesteld (zie Par. 3.3.1).

In de verkenning van de proeftechnische mogelijkheden wordt bekeken of en zo ja hoe fijnstofdeeltjes kunnen worden gemaakt die onderscheidbaar zijn van andere fijnstofdeeltjes in de natuur (Par. 2.1). De afstand van de bron tot de bomen moet worden berekend, zodat de deeltjes voldoende tijd hebben om op te drogen. De meteorologische omstandigheden vormen daarbij belangrijke randvoorwaarden en worden eveneens in Par. 2.1 in kaart gebracht. Daarnaast wordt berekend hoeveel vernevelaars nodig zijn en hoe deze geplaatst dienen te worden, zodat de fijnstof als goed gemengde en homogene wolk bij de bomen aankomt (Par. 2.2). Doordat de depositie op bomen volgens de literatuur slechts enkele procenten van het aanbod bedraagt, is het nodig een schatting te maken van de benodigde tijdsduur van de verneveling om voldoende aanbod van fijnstof te hebben, zodat er meetbare hoeveelheden fijnstof in de lucht en op de bomen verwacht mogen worden (Par. 2.3). Dit hangt tevens samen met de traceerbaarheid van de gebruikte tracer: deze moet ook in geringe hoeveelheden goed detecteerbaar zijn. Een bijkomend onderdeel is de hoeveelheden herwinbare tracer van de gewassen (Par. 2.4). Het bemonsteren van de lucht om zo de concentratie tracer te bepalen is van groot belang voor het opstellen van de massabalans en dient voldoende nauwkeurig te zijn (Par. 2.5). Alle informatie samen leidt tot de geometrie van een veldexperiment (Par. 2.6) en tot de mogelijkheid om de afvangstefficiency van stofdeeltjes te berekenen (Par. 2.7).

In Par. 2.8 van de proeftechnische verkenning worden de conclusies kort samengevat en wordt een aanbeveling geformuleerd voor de veldexperimenten.

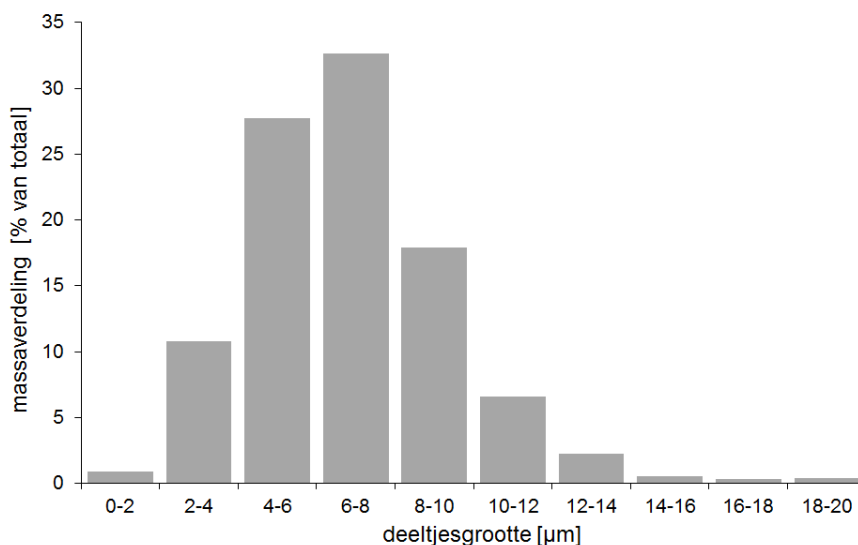


Figuur 2. Grove den (links) en haagbeuk (rechts) zoals in de proef gebruikt.

## 2.1 Het maken van fijnstofdeeltjes

In de experimenten wordt fijnstof gemaakt door het vernevelen van een vloeistof waarin de tracer is opgelost. De druppeltjes drogen op, terwijl ze door de lucht naar de bomen waaien. Afhankelijk van de beginconcentratie van de tracer in de te vernevelen vloeistof ontstaan stofdeeltjes van een bepaalde grootte. Als tracer is gekozen voor een fluorescente kleurstof, Brilliant Sulfo Flavine (BSF; CI 56205). Deze stof komt niet vrij in de natuur voor en kan door middel van fluorimetrie in zeer geringe hoeveelheden op bijvoorbeeld een blad goed vastgesteld worden.

De vernevelaar produceert druppeltjes die vele malen groter zijn dan het beoogde fijnstof, maar de concentratie van de tracer wordt zodanig gekozen dat na volledige droging fijnstofdeeltjes worden verkregen die voldoende klein zijn. De vernevelaar produceert druppeltjes van uiteenlopende grootte. Grootte en aantal kan in het laboratorium worden vastgesteld (Holterman & Pronk 2011). De uiteindelijke grootteverdeling van de fijnstofdeeltjes kan hieruit worden berekend (zie Figuur 3). De grootteverdeling van de stofdeeltjes wordt gestuurd met de concentratie BSF in de te vernevelen vloeistof. Tabel 1 toont voor enkele BSF-concentraties na volledige droging de gemiddelde deeltjesgrootte en de globale range van groottes (waartussen zich 80% van de deeltjes bevinden). Uit simulaties met het driftmodel IDEFICS (Holterman *et al.* 1997) is berekend wat de maximaal toelaatbare windsnelheid is om ten minste 80% droog fijnstof te verkrijgen bij een gegeven temperatuur en luchtvochtigheid, als de vernevelaars op 30 m voor de bomen staan. In Tabel 2 is voor verschillende combinaties van temperatuur en luchtvochtigheid aangegeven wat deze maximaal toelaatbare windsnelheid is. Bijvoorbeeld bij een temperatuur van 25°C en een relatieve vochtigheid van 50% mag de gemiddelde windsnelheid niet meer dan 3,3 m/s bedragen. Uiteraard is een lagere windsnelheid in die situatie beter, aangezien het percentage droge stofdeeltjes dan hoger zal zijn.



*Figuur 3. Grootteverdeling van fijnstofdeeltjes zoals geproduceerd ten behoeve van de experimenten bij een beginconcentratie van de tracer van 1,3 g/L.*

*Tabel 1. Concentratie BSF en de gemiddelde deeltjesgrootte en spreiding bij opgedroogde deeltjes.*

| Concentratie BSF<br>[g/L] | Gemiddelde grootte<br>[µm] | Range van groottes<br>[µm] |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1,3                       | 6,6                        | 3,8 – 10,0                 |
| 0,4                       | 4,5                        | 2,6 – 6,8                  |
| 0,1                       | 2,8                        | 1,6 – 4,3                  |

*Tabel 2. Randvoorwaarden gesteld aan de weersomstandigheden voor het uitvoeren van de veldexperimenten: maximaal toelaatbare windsnelheid (m/s) bij gegeven temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en een afstand van 30 m tussen vernevelaars en bomenhaag.*

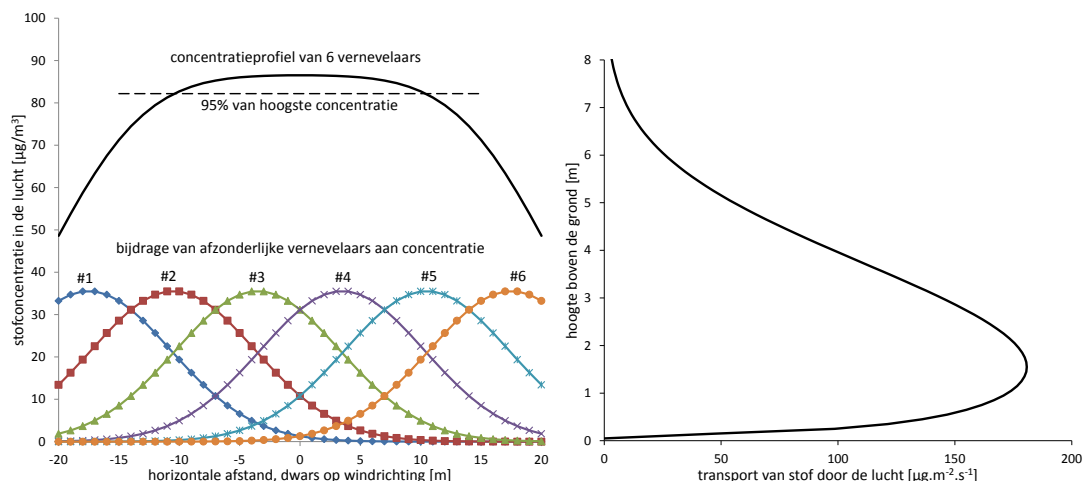
| Temperatuur [°C] | Relatieve luchtvochtigheid |     |     |     |     |
|------------------|----------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                  | 40%                        | 50% | 60% | 70% | 80% |
| 15               | 3,2                        | 2,6 | 2,2 | 1,8 | 1,3 |
| 20               | 3,6                        | 2,9 | 2,5 | 1,9 | 1,4 |
| 25               | 3,9                        | 3,3 | 2,6 | 2,1 | 1,5 |
| 30               | 4,2                        | 3,5 | 2,9 | 2,3 | 1,7 |

## 2.2 Van puntbron naar lijnbron

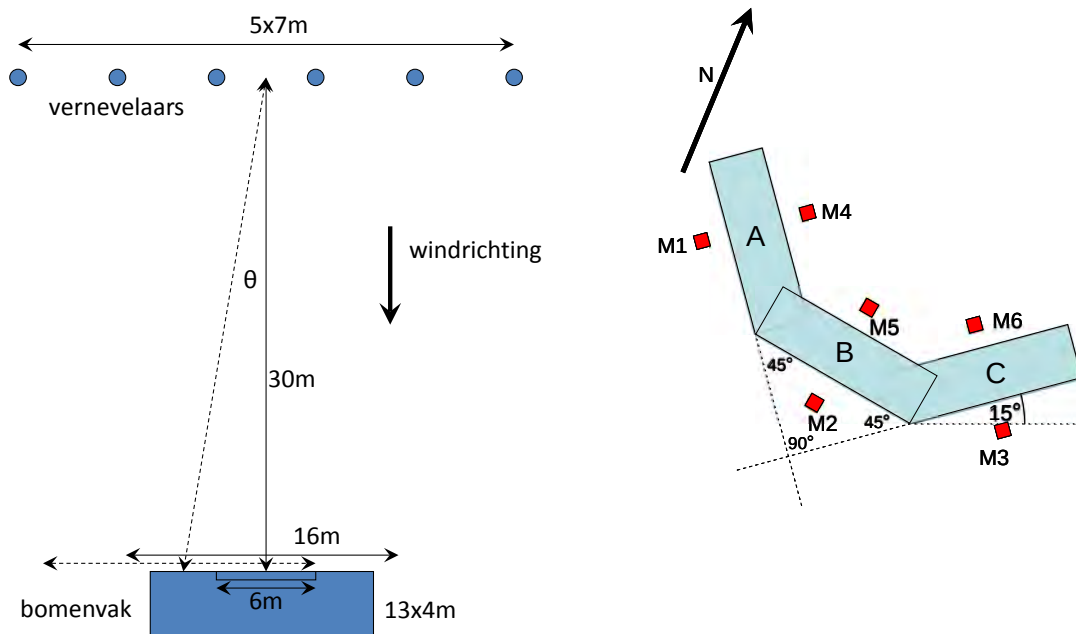
Op de schaal van het experiment is elke vernevelaar als een puntbron van druppeltjes op te vatten. De druppeltjes verspreiden zich in de lucht in de vorm van een pluim. Windafwaarts wordt deze pluim steeds breder en hoger, volgens algemeen geldende fysische principes (zie bijlage I voor een gedetailleerde beschrijving). Wanneer verschillende vernevelaars naast elkaar worden opgesteld, overlappen druppelpluimen windafwaarts elkaar uiteindelijk en ontstaat een homogeen vlak van druppeltjes in het horizontale vlak (Figuur 4, links). Hoe meer puntbronnen naast elkaar hoe breder dit homogene vlak. Dit vlak moet voldoende breed zijn zodat alle bomen met een gelijke hoeveelheid deeltjes worden belast. Om de deeltjes voldoende tijd te geven om op te drogen moet de afstand van vernevelaar tot de haag minimaal 30 m zijn (Par. 2.1). Zes nevelaars naast elkaar (Figuur 5) met een onderlinge afstand van 7 m, vormen een voldoende breed homogeen vlak.

De hoeveelheid stof die gedurende een bepaalde tijd langs komt waaien, is afhankelijk van lokale concentratie en windsnelheid. Het verticale verloop van dit stoftransport is te zien in Figuur 4, rechts, op 30 m afstand van 6 vernevelaars, in het centrum van de pluim. Dicht bij de grond is de concentratie niet nul, maar daar waait het bijna niet zodat het stoftransport toch gering is. Op grotere hoogte is de concentratie laag en het stoftransport dus ook. De meeste stof blijkt ongeveer op een hoogte van ca. 1,5 m langs te komen, dus op ongeveer de hoogte waarop de vernevelaars staan opgesteld.

In de meest ideale situatie staat de wind loodrecht op de haag. Wijkt de gemiddelde windrichting af van haaks, dan kunnen de zes vernevelaars zijwaarts verplaatst worden zodat het homogene front opnieuw over het bomenvak komt te liggen. Een afwijking van de gemiddelde windrichting van meer dan 30 graden is niet wenselijk; de vernevelaars moeten dan te ver verplaatst worden en een homogeen front kan niet langer gegarandeerd worden. Bovendien wordt de kans groot dat een aanzienlijk deel van de deeltjeswolk langs de bomen waait.



Figuur 4. Links: horizontaal concentratieprofiel van het tracer aerosol bij gebruik van 6 aerosolgeneratoren met onderlinge afstand van 7 m; de afstand tussen generatoren en meetmast is op 30 m gesteld. Rechts: stoftransport door de lucht als functie van de hoogte, in het centrum van de pluim.



Figuur 5. Schematisch overzicht (bovenaanzicht) van de vernevelaars op 30 m voor de bomenhaag bij wind loodrecht op de bomenhaag (rechts) en De geometrische inrichting van het veld. De rode vierkantjes zijn de meetmasten, respectievelijk M1 tot en met M6 en de aanduiding A, B en C zijn de geulen waarin de bomenhaag is aangelegd bij de gewasbespuitingen. Bij windrichtingen variërend van west zuid west, tot oost zuid oost kunnen bespuitingen worden uitgevoerd (zie Tabel 5).



## 2.3 Bespuitingsduur en detectiegrens

De concentratie BSF wordt bepaald in het laboratorium met behulp van een fluorimeter. De monsters of collectoren met BSF worden standaard met 50 ml gedemineraliseerd water ('demiwater') gespoeld en de laagste concentratie BSF die de fluorimeter kan meten (de detectiegrens) is ongeveer 20 µg/L of 0,02 µg/mL. Dit is enigszins afhankelijk van het type collector waarop BSF moet worden vastgesteld, doordat ook schone collectoren in meerdere of mindere mate een signaal geven in de fluorimeter. Bij een gekozen oppervlak blijkt de globale detectiegrens voor BSF gedeponerd op filters, naalden en bladeren dan ongeveer 0,02 µg/cm<sup>2</sup> te zijn. Voor een inschatting van de benodigde bespuitingsduur wordt ervan uitgegaan dat gemeten concentraties ten minste 4 maal hoger moeten zijn dan deze detectiegrens (0,08 µg/cm<sup>2</sup>). De concentratie BSF wordt bepaald voor en achter de bomenhaag, op de grond in de bomenhaag, en op de bomen. De hoeveelheid deeltjes die op de bomen achterblijft is afhankelijk van de grootte van de deeltjes. Grotere deeltjes botsen makkelijker tegen naalden, takken en bladeren dan kleinere deeltjes. (Beckett *et al.* 2000a) vonden in windtunnelexperimenten een afvang efficiëntie van ca. 0,4% voor deeltjes met een diameter van 1,3 µm bij een windsnelheid van 3 m/s. Grotere deeltjes botsen gemakkelijker en daardoor is hun afvangkans groter. Voor het berekenen van de bespuitingsduur wordt een afvangkans van 10% voor deeltjes van 5,1 µm aangenomen. Afvangkansen voor andere diameters kunnen hieruit worden afgeleid door interpolatie en extrapolatie. Tevens is aangenomen dat het homogene vlak van stofdeeltjes vlak voor de haag nog 10% van de uitgebrachte hoeveelheid fijnstof bevat, tot de hoogte van de bomen. Verdere aannames: de vernevelaars staan 7 m uit elkaar en de dosering is 15 L/uur; een boom is globaal 2 m hoog en beslaat een grondoppervlakte van 1x1 m<sup>2</sup>; elke boom heeft een totale bladoppervlakte van 3 m<sup>2</sup>. Tabel 3 toont bij enkele BSF-concentraties de globale diameter van opgedroogde stofdeeltjes, de geschatte afvangkans hiervan in de bomen, en de daaruit af te leiden minimale meettijd om op de voorste boom een significante hoeveelheid stofdepositie te verkrijgen. Uit praktisch oogpunt wordt gekozen voor een bespuitingsduur niet langer dan 60 min; dit is voldoende lang om de gemiddelde weersomstandigheden nauwkeurig te kunnen vastleggen. Een bijkomend probleem van een langere bespuitingsduur is dat de weersomstandigheden waarschijnlijk niet voldoende constant zullen blijven tijdens de meting. Volgens de tabel is een bespuitingsduur van 60 min geschikt voor metingen bij BSF-concentraties 1,3 en 0,4 g/L, maar bij 0,1 g/L BSF zou een meettijd van zo'n 3 uur nodig zijn. Bij deze lage BSF-concentratie is dus niet te verwachten dat stofdepositie op de bomen meetbaar zal zijn.

Bij de laagste BSF-concentratie blijkt de minimaal benodigde meettijd voor de filters ca. 11 min te bedragen. Concentratie is hier dus geen belemmerende factor om een voldoende nauwkeurig concentratieprofiel te kunnen vaststellen.

Tabel 3. Schatting van minimale meettijd bij diverse beginconcentraties BSF.

|                                | Concentratie BSF [g/L] |     |     |
|--------------------------------|------------------------|-----|-----|
|                                | 1,3                    | 0,4 | 0,1 |
| Berekende einddiameter [µm]    | 6,6                    | 4,4 | 2,8 |
| Geschatte afvangkans [%]       | 18                     | 7   | 2,4 |
| Minimale bespuitingsduur [min] | 2,8                    | 23  | 276 |

## 2.4 De hoeveelheid herwinbare tracer van gewassen en stoffilters

Het is mogelijk dat een bepaalde hoeveelheid tracer niet van het interceptieoppervlak kan worden teruggewonnen doordat de tracer zich te vast hecht aan het interceptieoppervlak. De hoeveelheid herwinbare tracer van gewassen en stoffilters is daarom experimenteel vastgesteld. Voor gewassen zijn bladeren en takken van de loofboom haagbeuk (*Carpinus betulus*) en naalden, takken en topjes van de naaldboom grove den (*Pinus sylvestris*) bespoten met vloeistof met drie concentraties BSF (0,4 g/L, 0,04 g/L en 0,04 g/L+1,0 g NaCl/L). Per bespuiting zijn 10 bladeren dan wel takjes of topjes bespoten. Om de depositie van fijnstof zo goed mogelijk te benaderen, is de bespuiting uitgevoerd met een gangbare spuitdop die kleine druppels produceert (doptype Delavan LF 110-01, spuitdruk 4,5 bar; druppelgrootte gemiddeld 135 µm, range 63 – 227 µm). Met de methode van Bijlage III is vervolgens de globale droge deeltjesgrootte berekend voor de diverse bespuitingen (zie Tabel 4, 2<sup>e</sup> kolom). De methode van directe bespuiting komt weliswaar niet overeen met depositie van door de lucht getransporteerd fijnstof, wel zijn de droge deeltjes in de gewenste orde van grootte. Na afspoelen is in de vloeistof de BSF concentratie bepaald, het oppervlak van de bladeren en de herwinbare fractie uitgerekend.

Opvallend is dat de hoeveelheid herwinbare tracer van naalden en takken van grove den groter is dan de hoeveelheid gespoten tracer en daardoor hoger is dan 100% (Tabel 4). Dit komt waarschijnlijk doordat de grotere druppeltjes niet veel kleiner zijn dan de diameter van de naalden en takken, zodat deze druppels die vlak langs een naald of tak vallen, soms nog net de naald of tak raken en eraan vast blijven zitten. De effectieve interceptieoppervlakte is dan groter dan de geprojecteerde naald- of takoppervlakte. Ook kan de min of meer cilindrische vorm van naalden en takken nog een rol spelen. De standaardafwijking is echter in alle gevallen dusdanig groot, dat niet aan te tonen is dat de hoeveelheid herwinbare tracer als percentage significant van 100% afwijkt. Bij haagbeuk zijn de gemiddelde hoeveelheden herwinbare tracer iets lager, maar ook hier meestal niet significant van 100% verschillend. De hoeveelheden herwinbare tracer van de bladeren van haagbeuk komt overeen met de hoeveelheden herwinbare tracer van BSF van de bladeren van andere loofbomen (Ucar *et al.* 2003). De hoeveelheden herwinbare tracer van de filters en van chromatografiepapier is alleen bij de hoogste BSF-concentratie getest en, hoewel iets lager dan 100%, ook niet significant verschillend van 100%.

Uit dit experiment blijkt dat de hoeveelheden herwinbare tracer voldoende hoog is en dat de afspoeltechniek een goede methode is om de hoeveelheid BSF op naalden en bladeren in de veldexperimenten vast te stellen.

Tabel 4. De herwinbare fractie (%) van de tracer per gewasonderdeel. Tussen haakjes de standaardafwijking.

| BSF-concentratie [g/L] | Deeltjes-grootte [µm] | Grove Den |          |          | Haagbeuk       |                |          | Filter         | Chrom <sup>1</sup> |
|------------------------|-----------------------|-----------|----------|----------|----------------|----------------|----------|----------------|--------------------|
|                        |                       | Naald     | Tak      | Top      | Blad bovenkant | Blad onderkant | Tak      |                |                    |
| 0,4                    | 4-15                  | 109 (15)  | 99 (12)  | 119 (25) | 94 (12)        | 112 (10)       | 93 (15)  | 88 (16)        | 89 (10)            |
| 0,04                   | 2-7                   | 109(14)   | 199 (87) | 159 (58) | 73 (25)        | 79 (13)        | 92 (64)  | – <sup>2</sup> | – <sup>2</sup>     |
| 0,04 + 1,0 NaCl        | 6-20                  | 118 (9)   | 138 (60) | 142 (70) | 77 (10)        | 102 (10)       | 123 (89) | – <sup>2</sup> | – <sup>2</sup>     |

<sup>1</sup> Chromatografiepapier.

<sup>2</sup> Niet gemeten.

## 2.5 Bemonstering van deeltjes in de lucht

Wanneer van aerosolmetingen gebruik wordt gemaakt om concentratieprofielen in de hoogte te meten en daar een massaflux uit af te leiden, moet in principe al het aerosol dat in de lucht wordt gebracht ook integraal worden bemeten. Dit is een belangrijk punt van aandacht, omdat de windsnelheden voor en achter de vegetatie sterk verschillen en bekend is, dat de windsnelheid van invloed kan zijn op het vangstrendement van de filterkoppen voor deeltjes.

In de proefopzet wordt gebruik gemaakt van zogenaamde 'open-face' filterhouders voor filters met een diameter van ca. 5 cm. In Bijlage II is een berekening uitgevoerd om na te gaan wat de relatie is tussen deeltjesgrootte en de afvangefficiëntie van de filters. De berekeningen zijn uitgevoerd voor windsnelheden tussen 0,5 m/s en 4 m/s. De lage snelheden zijn representatief voor de windsnelheden achter de vegetatie, de hoge windsnelheden zijn representatief voor windsnelheden waarbij nog voor voldoende droging van de spuitvloeistof kan worden gerealiseerd bij voldoende lage relatieve luchtvochtigheid. Bij hogere windsnelheden is de verdampingstijd te kort en berekeningen zijn daarom niet uitgevoerd.

Bij lage windsnelheden kan de gehanteerde monsternemer-geometrie deeltjes tot 20 µm vangen met een efficiëntie van 100%. Bij hogere windsnelheden neemt de vangstefficiëntie van deeltjes groter dan 5 µm af tot 97% voor 10 µm deeltjes bij 4 m/s en 91% voor 20 µm deeltjes ook bij 4 m/s. Bij de hoogste BSF-concentratie in de experimenten bestaat 90% van alle stof uit deeltjes kleiner dan 10 µm (zie Par. 2.1); bij de lagere concentraties zijn de stofdeeltjes gemiddeld kleiner. Dit betekent dat aangenomen mag worden dat het afvangrendement van de filters in alle gevallen zeer goed is en slechts een zeer geringe invloed (maximaal enkele procenten) op de meetresultaten zal hebben.

## 2.6 De geometrie van de veldproef

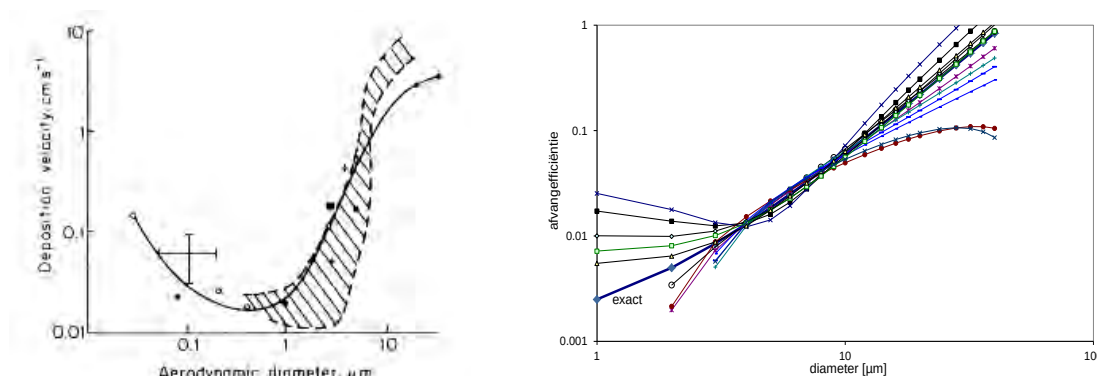
Voor het uitvoeren van de proeven is het belangrijk dat er aan de bovenwindse zijde, daar waar de vernevelaars staan, een ongestoord windprofiel is. Daarom moet de afstand tussen een eventueel obstakel groter zijn dan 10x de hoogte van het obstakel. Omdat de wind loodrecht op de haag moet staan, en de weerscondities aan strenge eisen moet voldoen, is gekozen voor de mogelijkheid om de haag ten opzichte van meetmasten op verschillende manieren te kunnen plaatsen. De drie beplantingsvakken liggen onderling onder een hoek van 45 graden (Figuur 5, rechts) zodat drie windrichtingen benut kunnen worden voor de experimenten. De hoek tussen de beplantingsvakken en de positie t.o.v. het noorden bepalen de mogelijke windrichtingen en de hoeken waarbij een keuze voor het gebruik van een bepaalde geometrie wordt gedaan. Tabel 5 geeft de bruikbare gemiddelde windrichtingen per beplantingsvak aan (NB: N=0, O=90°, Z=180°, W=270°).

Tabel 5. Windrichtingen per beplantingsvak.

| Vak | Windhoek [°] | Globale indicatie windrichting |
|-----|--------------|--------------------------------|
| A   | 211-255      | WZW-ZZW                        |
| B   | 166-210      | ZZW-ZZO                        |
| C   | 121-165      | ZZO-OZO                        |

## 2.7 Relatie tussen deeltjesgrootte en afvangkans

De aanpak van het onderzoek is erop gericht om de afvang efficiëntie te bepalen van de fijnstofdeeltjes. De afvangkans hangt samen met de deeltjesgrootte, welke gevarieerd wordt in de experimenten door aanpassingen in de BSF-concentratie. In de literatuur wordt veelal gewerkt met de algemene term depositiesnelheid (Figuur 6-links). De depositiesnelheid neemt in eerste instantie af tot een deeltjesgrootte van ongeveer  $1\text{ }\mu\text{m}$ , om daarna weer toe te nemen. De depositiesnelheid is gerelateerd aan de afvangkans. Er mag een soortgelijk verband verondersteld worden tussen de afvangkans en deeltjesgrootte als tussen de depositiesnelheid en deeltjesgrootte. Complicerende factor daarbij is dat in de experimenten niet één vaste deeltjesgrootte aanwezig is, maar een spectrum aan deeltjes van verschillende groottes (zie ook Par. 2.1). Met behulp van een daartoe afgeleide wiskundige analysemethode (zie Bijlage V) blijkt het toch mogelijk om de relatie tussen deeltjesgrootte en afvangkans vast te stellen, als de grootteverdeling van de deeltjes bekend is (Figuur 6).



Figuur 6. Depositiesnelheid van deeltjes als functie van de aerodynamische diameter (Graedel & Crutzen 1993) (links) en een rekenvoorbeeld van gefitte afvang efficiënties als functie van de deeltjesgrootte (rechts).

## 2.8 Conclusie en aanbevelingen

### 2.8.1 Conclusies

- Met de gekozen generatoren en BSF kunnen droge aerosolen worden gegenereerd waarvan de grootte (het aangeboden spectrum) goed te berekenen is. Daarmee is de deeltjesgrootteverdeling die bij de bomenhaag aankomt bekend en kan de relatie tussen deeltjesgrootte en afvangkans berekend worden.
- Bij gebruik van 6 aerosolgeneratoren, bij een windrichting die niet meer dan  $30^\circ$  van loodrecht op de vegetatie afwijkt, is over een lengte van ongeveer 20 m een redelijk homogeen horizontaal concentratieprofiel beschikbaar. In verticale richting heeft dit profiel een maximum binnen de boomhoogte.
- Voor stofdeeltjes met diameter van ca.  $4\text{ }\mu\text{m}$  en groter is een bespuitingsduur van 60 minuten per experiment voldoende voor depositiebepalingen van stof op de bomen. Voor het detecteren van kleinere deeltjes op het gewas neemt de benodigde meettijd snel toe tot onpraktische waarden.
- De tracer BSF is goed van de gewassen en filters af te spoelen zodat een nauwkeurige bepaling van de depositie op de gewassen en de stoffilters mogelijk is.
- De vangstefficiëntie door de stofmonsterkoppen voor deeltjes tot  $20\text{ }\mu\text{m}$  is zeer hoog voor alle voorkomende windsnelheden. Daarom worden er geen systematische verschillen tussen voorste en achterste mast verwacht.
- Via een wiskundige analyse is het mogelijk om de afvangkans voor de verschillende deeltjesgrootten te berekenen. Onder de veronderstelling dat de afvangkans hooguit een kwadratisch verband heeft met de deeltjesgrootte in het onderzochte bereik, kan de afvangkans voor de deeltjes tussen  $2,5$  en  $10\text{ }\mu\text{m}$  geschat worden. Daarbij moeten wel bij minimaal drie deeltjesgroottes (dus drie BSF-concentraties) metingen verricht worden.

## 2.8.2 Aanbevelingen

Op grond van de hierboven gepresenteerde conclusies kunnen de beoogde experimenten technisch uitgevoerd worden voor deeltjesgrootten tussen 2,5 en 10  $\mu\text{m}$ . Aan de voorwaarden/eisen die nodig zijn om een 'goed' en deugdelijk resultaat te verkrijgen kan voldaan worden. De randvoorwaarden/eisen geven wel aan dat het om zeer experimentele proeven gaat, waarbij ook tussentijds voldoende ruimte en tijd moet worden ingebouwd om optredende afwijkingen van de verwachtingen goed te kunnen ondervangen. Daarbij is het venster van bruikbare weersomstandigheden smal.

Indien ook gegevens voor deeltjes kleiner dan 2,5  $\mu\text{m}$  worden gewenst, moet naar een tracer worden gezocht met een lagere detectiegrens. Dit is technisch mogelijk, doch de analysekosten per monster worden dan flink hoger. Nadere analyse van de omstandigheden waarbij het aerosol nat dan wel droog is, is gewenst.



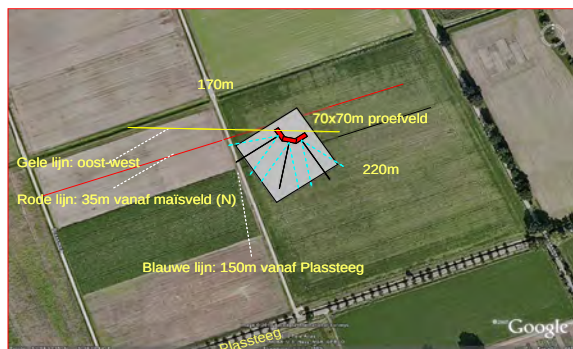
### 3. Materiaal en methoden veldexperimenten

#### 3.1 De layout van de proef

##### *Het proefveld*

De proef werd uitgevoerd op het proefveld van Unifarm gelegen aan de Plassteeg te Wageningen. Het proefveld was een open terrein met in de directe omgeving weinig obstakels die de wind kunnen beïnvloeden (Figuur 7 links). De dichtstbijzijnde obstakels (bomen langs de eerstvolgende weg) stonden meer dan 10x hun hoogte van de opstelling vandaan, waren gesnoeid en de kronen raken elkaar nauwelijks. De haag in de proef bestond uit drie gewasrijen van in totaal 35 grove dennen of 47 haagbeuken. De bomen stonden in containers (potten) die samen in een gegraven geul stonden, zodat de bovenkant van de containers op maaiveldhoogte stond (Figuur 7 rechts).

Op 30 m voor de haag stonden de zes vernevelaars die gedurende één uur gemiddeld 15,3 liter oplossing met BSF verspoten. Afhankelijk van de windrichting moest het meetvak gekozen worden (A, B of C in Figuur 5, rechts). De drie geulen waren onderling 45 graden gedraaid, zodat experimenten konden worden uitgevoerd bij windrichtingen variërend tussen globaal oost-zuid-oost en west-zuid-west (zie ook Tabel 5).



Figuur 7. Geografische ligging van het proefveld (links) en geometrische inrichting van het veld (rechts).

##### *De bomen*

De bespuitingen werden uitgevoerd met de naaldboom grove den (*Pinus sylvestris*) en de loofboom haagbeuk (*Carpinus betulus*). De bomen waren ongeveer 2 m hoog en staan in pot. De pothoogte sloot aan bij de bovenkant van het maaiveld. Hiervoor was een gat gegraven van ongeveer 40 cm diep over het gehele oppervlak van de beplantingsvakken. Alle bomen waren vanaf het grondoppervlak goed vertakt zodat de wind nauwelijks onder de bomen door waait (Figuur 8).

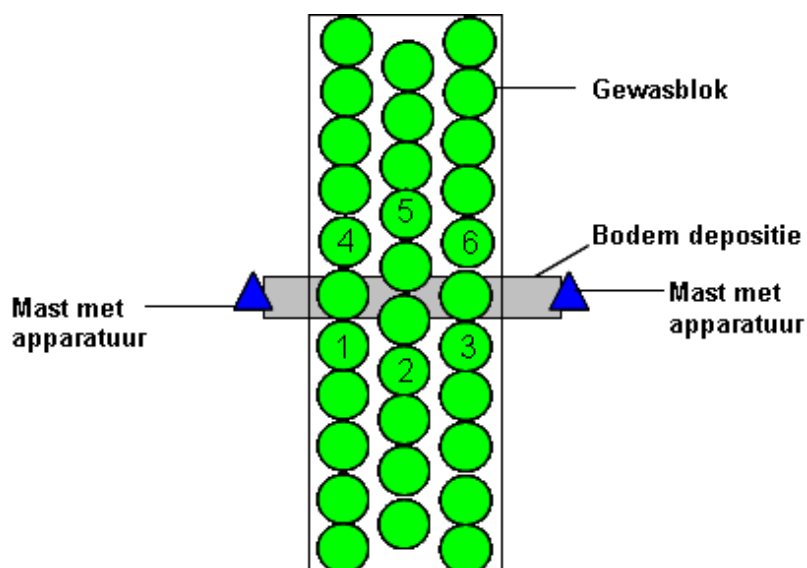


Figuur 8. Een vooraanzicht van de haag met grove den (links) en met haagbeuk (rechts).

Een bespuiting maakte gebruik van één beplantingsvak. Bij de experimenten met grove den waren de beide andere vakken dan leeg; bij die met haagbeuk was één ander vak gevuld met dennen. De bomen werden in drie rijen geplaatst zodat het vak voorzien was van een haag. Hiervoor werden 11, 10 en 11 naaldbomen geplaatst en 16, 15 en 16 loofbomen (zie Figuur 9). De potten en ruimte tussen de potten werden afgedekt met wit plastic (Figuur 2, rechts) om verstoring van de gaten op het windprofiel te voorkomen en zo werd ook het temperatuurprofiel niet verstoord (zoals in geval van zwart plastic). De bomen werden in de rij met een onderlinge afstand geplaatst van 0,95 m (grove den) of 0,60 m (haagbeuk). Dit is dus de effectieve breedte die per boom beschikbaar is (zie Tabel 6). Evenzo is de afstand tussen de rijen op te vatten als de effectief beschikbare diepte per boom.

Tabel 6. Globale hoogte, breedte en diepte van een boom in de bomenhaag.

| Boomsort  | Hoogte [m] | Breedte [m] | Diepte [m] |
|-----------|------------|-------------|------------|
| Grove den | 2,20       | 0,95        | 1,10       |
| Haagbeuk  | 2,20       | 0,60        | 0,68       |



Figuur 9. Plaatsing van de bomen (bovenaanzicht). Voorkant is links, achterkant is rechts.

Van bomen 1, 2, 3 werden gewasmonsters verzameld na iedere bespuiting (zie verderop).

Na afloop van de veldexperimenten werd de bladoppervlakte van de meetbomen bepaald met een bladoppervlaktemeter (LI-COR model 3100 Area Meter, Lincoln NB, USA) en de oppervlakte van de takken werd opgemeten door de lengte en de diameter te meten. De afmetingen van de haag werden opgemeten evenals de uiteindelijke hoogte. Voor vergelijking met de uitgevoerde veldexperimenten van 2010 werden lichtinterceptiemetingen uitgevoerd in de grove den. Uit de vergelijking van de lichtinterceptiemetingen van 2010 en 2011 en de destructieve metingen met de bladoppervlaktemeter in 2011, werd de totale depositieoppervlakte (naald plus takoppervlak) voor de veldexperimenten in 2010 berekend (zie Par. 4.3.4).

#### De meetmasten

Rondom de geul stonden meetmasten. De masten M1, M2 en M3 (Figuur 5, rechts) stonden 1,5 m voor de bomenvakken en waren 6 m hoog. De masten M4 en M6 stonden 1,5 m achter de vakken en waren 8 m hoog. Mast M5 was 10 m hoog en had in de top een windvaan. In de masten werden op 8 hoogtes windmeters en afzuigfilters voor



fijnstof opgehangen (Figuur 10, midden, Tabel 7). Fijnstof deponeerde op filters door de actieve aanzuiging van lucht door de filters. In de masten werden per meethoogte 3 armen gehangen: voor anemometer (windsnelheid), rotronic (temperatuur en luchtvochtigheid) en stofsensor. De gegevens werden gelogd met een datalogger. Voor de afzuiging van lucht door de filters werd gebruik gemaakt van twee pompen, voor beide masten een pomp (Becker vacuüm-pomp VX4.40; capaciteit 40 m<sup>3</sup>/h, maximale onderdruk 100 mbar). In de toevoer werd elke filterkop op de pomp aangesloten via een zogenaamd kritisch capillair met een interne diameter van 2,8 mm. Per filter kon zo het afzuig-debiet constant gehouden worden op 64 L/min. Voor de algehele energievoorziening was een dieselgenerator van 25 kW beschikbaar.

Tabel 7. De hoogte van de anemometers en de stoffilters bij de meetmasten 2,3, 5 en 6.

| Hoogte nummer | Hoogte van anemometers en stoffilters [m] |        |        |        |
|---------------|-------------------------------------------|--------|--------|--------|
|               | Mast 2                                    | Mast 3 | Mast 5 | Mast 6 |
| 1             | 0,47                                      | 0,39   | 0,48   | 0,41   |
| 2             | 1,06                                      | 0,98   | 0,97   | 0,97   |
| 3             | 1,92                                      | 1,83   | 1,79   | 1,83   |
| 4             | 2,51                                      | 2,41   | 2,42   | 2,43   |
| 5             | 3,09                                      | 2,95   | 3,00   | 2,98   |
| 6             | 3,61                                      | 3,53   | 3,52   | 3,56   |
| 7             | 4,49                                      | 4,43   | 5,53   | 5,23   |
| 8             | 5,62                                      | 5,88   | 7,56   | 7,71   |

#### De verneveling

De BSF-oplossing werd verneveld gedurende ongeveer 1 uur, in welke tijd gemiddeld 15,3 L werd verspoten per vernevelaar. Bij een beginconcentratie van 1,3 g/L werd zodoende 19,9 g BSF uitgebracht per vernevelaar. De afstand tussen de vernevelaars was 7,0 m, dus per strekkende meter werd gemiddeld 2,84 g BSF in de lucht gebracht gedurende een experiment. Op soortgelijke wijze is te bepalen dat bij een beginconcentratie van resp. 0,4 en 0,1 g/L aan BSF in de lucht werd gebracht 0,87 en 0,22 g per strekkende meter. Deze waarden zijn van belang om te bepalen hoeveel hiervan uiteindelijk bij de bomen aankomt.

## 3.2 Weersgegevens

Voor het opstellen van de massabalans voor deeltjes is het noodzakelijk de windrichting en het windprofiel vast te stellen. De windrichting is op de standaardhoogte van 10 m gemeten bovenop de middelste mast achter. De windsnelheid voor het vaststellen van het windprofiel is op 8 hoogten per meetmast bepaald, aan de voorzijde van de bomenhaag tot ongeveer 6 m hoog, achter de bomenhaag tot ongeveer 8 m hoog (Tabel 7, Par. 3.1). De windsnelheid is bepaald met cupanemometers (Figuur 10, links), die voor gebruik in het veld in een windtunnel zijn geijkt tegen een NMI gekalibreerde cupanemometer. De aanspreeknelheid (windsnelheid waarbij de meter begint te draaien) varieert per instrument tussen 0,10 en 0,58 m/s met een mediaan rond 0,4 m/s. Er zijn 9 relatief nieuwe anemometers gebruikt en 7 oude instrumenten. De aanloopsnelheden voor de oudere anemometers liggen gemiddeld wat hoger dan voor de nieuwere anemometers. De nieuwere anemometers, die iets nauwkeuriger zijn, zijn op de tweede mast (achter de vegetatie) geplaatst omdat de windsnelheden daar het laagst zullen zijn. De temperatuur en relatieve luchtvochtigheid werden gemeten op 2 hoogten. Ook deze sensoren zijn voorafgaande aan gebruik geijkt in een gethermostatiseerde meetruimte. Voor deze instrumenten is de standaarddeviatie in de temperatuur ongeveer 0,14°C en in de relatieve luchtvochtigheid ongeveer 1,5%.

De windrichtingsmeter is in de juiste positie gezet door deze met een kompas op het noorden te richten. Het signaal van de windrichtingsmeter is vergeleken met de windrichting van het meteostation aan de Haarweg te Wageningen

op 2,5 km afstand, om te kunnen compenseren voor kleine systematische verschillen. Daarbij werd verondersteld dat de benodigde correctie voor alle windrichtingen gelijk zou zijn. De aldus bepaalde correctie bedroeg  $12^\circ$ . Hoewel de weerscondities op de meetlocatie kunnen afwijken van de situatie aan de Haarweg zijn de gegevens van die locatie geschikt om te gebruiken voor een globale controle van de windrichting, de windsnelheid en de relatieve luchtvochtigheid.

De signalen van de anemometers en de sensoren voor temperatuur, luchtvochtigheid en windrichting worden continu gemeten en op de datalogger opgeslagen. De datalogger is benedenwinds op een afstand van 30 m geplaatst om beïnvloeding van de metingen te voorkomen. De frequentie van registratie is 1 keer per minuut. Van deze minuut is, in de experimenten van 2011, het signaal van de laatste 5 seconden gesommeerd (pulsen van de anemometers) of gemiddeld (temperatuur, luchtvochtigheid) respectievelijk vectoriëel gemiddeld (windrichting). In 2010 is de volle minuut geregistreerd. De datalogger werd dagelijks uitgelezen. Uit deze dataset werden de data behorende bij de experimenten geselecteerd.



*Figuur 10. Een cupanemometer voor het meten van de windsnelheid (links), een filter voor het meten van de hoeveelheid fijnstof (midden) en een weerhuisje voor het meten van de luchtvochtigheid en temperatuur (rechts).*

Na de experimenten hebben de instrumenten geen volledig nieuwe ijking doorlopen, maar zijn onderling vergeleken door ze met een onderlinge afstand van 0,8 m op één hoogte (1,5 m) te plaatsen. Op basis hiervan zijn (kleine) na correcties bepaald en gebruikt in de dataverwerking.

De weersgegevens zijn van groot belang voor de droging van de druppels op hun weg van vernevelaars naar de bomen. Om een indruk te krijgen van de deeltjesgroottes direct voor de bomen en de mate van droging van de druppelwolk zijn de veldexperimenten nagebootst met het simulatiemodel IDEFICS, onder gelijke weersomstandigheden. Het model berekende de verspreiding van kleine deeltjes in de lucht en de depositie van deze deeltjes op de grond.

De bomenhaag vormt een obstakel voor de wind; slechts een deel van de wind zal tussen de bomen door waaien, een ander deel zal opgestuwd worden en eroverheen waaien. Om een indruk te krijgen van de opstuwing van lucht voor de bomen, werd bij een aantal experimenten een ultrasoon anemometer (METEK, USA-1) geplaatst waarmee de windsnelheid en -richting in 3 dimensies kon worden gemeten. De ultrasoon anemometer werd zo dicht mogelijk voor de bomen geplaatst (ca. 0,5 m ervoor), op een hoogte van 1,0 m, dus halverwege de boomhoogte, in de verwachting dat opstuwing van lucht hier meetbaar zou moeten zijn. De anemometer mat elke 5 s de lokale windsnelheid in 3 dimensies, gedurende het hele experiment.

### 3.3 Bemonstering

De algemene werkwijze voor de bepaling van de hoeveelheid tracer op collectoren (zowel de kunstmatige collectoren als gewasmonsters) was als volgt. De collectoren werden droog en apart verpakt naar het laboratorium gebracht. Elke collector werd gespoeld in een vastgestelde hoeveelheid gedemineraliseerd water. De hoeveelheid spoelwater hangt van het type collector af (zie onder). Na een zekere inwerktijd was de tracer volledig opgelost in het spoelwater, waarna de concentratie tracer hierin werd gemeten met een fluorimeter (Perkin-Elmer LS 45). De gemeten fluorimeterwaarde bestond uit bijdragen van de tracer, het demiwater en de collector zelf. De fluorimeterwaarde van schoon demiwater werd apart bepaald. De bijdrage van een (schone) collector werd bepaald door deze te spoelen met demiwater en van het spoelwater de fluorimeterwaarde te meten; van deze waarde werd vervolgens de fluorimeterwaarde van het demiwater zelf afgetrokken. Voor de gebruikte tracer werd het verband vastgesteld tussen tracerconcentratie en fluorimeterwaarde door een reeks oplossingen met bekende tracerconcentraties te meten in de fluorimeter. Bij een bekende (gemeten) oppervlakte van de collector, is de hoeveelheid tracer per oppervlakte-eenheid op de collector als volgt te berekenen:

$$B_{coll} = \frac{(F - F_w - F_c) \cdot V_{sp} \cdot f_{ijk}}{A_{coll}} \quad (1)$$

Hierin is  $B_{coll}$  de hoeveelheid tracer per oppervlakte-eenheid (belading;  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ),  $F$  de gemeten fluorimeterwaarde in het spoelwater (in eenheden van de fluorimeter),  $F_w$  en  $F_c$  de fluorimeterwaarde van resp. demiwater en een schone collector,  $V_{sp}$  de hoeveelheid water waarin de collector gespoeld wordt (mL),  $A_{coll}$  de oppervlakte van de collector ( $\text{cm}^2$ ) en  $f_{ijk}$  de omrekenfactor ('ijkfactor') voor fluorimeterwaarde naar concentratie tracer ( $\mu\text{g}/\text{mL}$  per eenheid van de fluorimeter). De ijkfactor is een constante die alleen van het type tracer afhangt.

In al deze grootheden kunnen onnauwkeurigheden optreden. De grootste bijdragen aan de onnauwkeurigheid bleken afkomstig van  $F_w$  en  $F_c$ . Herhaalde metingen met de fluorimeter aan demiwater en schone collectoren leverden een gemiddelde en standaarddeviatie op voor  $F_w$  en  $F_c$ . De respectievelijke standaarddeviaties  $\Delta F_w$  en  $\Delta F_c$  zijn een goede maat voor de detectiegrens:

$$\Delta B_{coll} = \frac{(\Delta F_w + \Delta F_c) \cdot V_{sp} \cdot f_{ijk}}{A_{coll}} \quad (2)$$

Een belading in de orde van of lager dan deze detectiegrens is niet significant van nul verschillend. Aangezien elk type collector zijn eigen spoelvolumen en collectoroppervlakte had, kon de detectiegrens per type collector verschillend zijn. Duidelijk is dat spoelvolumen zo klein mogelijk en collectoroppervlakte zo groot mogelijk genomen moet worden voor een lage detectiegrens.



*Figuur 11. Het verzamelen van gewasmonsters voor analyse op de kunstmatige fijnstof (links) en het plaatsen van nieuwe onbelaste takken (rechts).*

### 3.3.1 Filters

De filters bestonden uit kleine papieren schijfjes (Macherey-Nagel; type MN GF-3). Een filterschijfje werd ingeklemd in een filterhouder, zie Figuur 10, midden. De effectieve diameter van het zichtbare deel van het filter (dus zonder de in de houder ingeklemde rand) bedroeg 3,9 cm, waarmee de effectieve oppervlakte 11,95 cm<sup>2</sup> werd. De houder werd bevestigd aan een slang waardoor lucht werd afgezogen. De gemiddelde afzuigsnelheid door de filters bedroeg 0,89 m/s (berekend op basis van het eerder genoemde debiet van 64 L/min; Par. 3.1). Filters werden in hun filterhouders naar het laboratorium getransporteerd, waar de filters uit de houders werden verwijderd. Elk filter werd gespoeld in een potje met 50 mL gedemineraliseerd water. De detectiegrens voor filters, bepaald met vgl. (2), lag bij ongeveer 0,01 µg/cm<sup>2</sup>.

### 3.3.2 Bodem

Collectoren op de grond bestonden uit rechthoekige synthetische doeken (Technofil TF 280; 1,00x0,10 m<sup>2</sup>). Kleine stofdeeltjes blijven hier gemakkelijk in hangen. Bij bemonstering werden doeken opgerold met de blootgestelde kant naar binnen, in een zakje gedaan en naar het laboratorium getransporteerd. Elke doek werd daar gespoeld in 1 L gedemineraliseerd water. De detectiegrens voor de doeken lag bij ongeveer 0,003 µg/cm<sup>2</sup>.

### 3.3.3 Gewas

Na iedere bespuiting werden naalden of bladeren verzameld van een boom in de voorste, middelste en achterste rij (Figuur 9 en Figuur 11). Bij de grove den werden per boom 12 monsters genomen, gelijkmatig verdeeld over de boom. Bij de haagbeuk werden 6 monsters genomen, omdat in de bovenste sectie van haagbeuk weinig zijtakken zaten voor bemonstering. Elke monster bestond uit een takje met een lengte van ongeveer 20 cm. Per bespuiting werden zodoende bij grove den 36 gewasmonsters verzameld en bij haagbeuk 24 gewasmonsters. In het laboratorium werden naalden en bladeren geplukt van de takken. Deze naald- en bladmonsters werden gespoeld met 50 mL gedemineraliseerd water, waarin vervolgens de concentratie BSF werd bepaald. Niet alleen op de naalden en bladeren, maar ook op de takken kon tracer gedeponeerd zijn. Daarom werden bij de experimenten met haagbeuk ook de takjes, na verwijdering van de bladeren, geanalyseerd op tracer. Deze takjes werden in stukken geknipt en gespoeld met 100 mL water. Voor de grove den bleek dit niet mogelijk, aangezien het hars uit de wondjes de fluorimeter zou vervuilen. Er werden ook 'blanco' metingen gedaan aan gewasmonsters die vrij van BSF waren, om de bijdrage aan de fluorimeterwaarde van deze monsters te bepalen.

De detectiegrens voor gewasmonsters hangt nauw samen met de totale oppervlakte per monster. Voor elk monster werd deze oppervlakte apart vastgesteld met een bladoppervlaktemeter, LI-COR model 3100 Area Meter (Lincoln, NB, USA). Hier wordt volstaan met enkele typische waarden ter indicatie. Een monster van 50 naaldenparen had een globale oppervlakte van ca. 40 cm<sup>2</sup>. De bladeren van een takje uit de haagbeuk hadden een gezamenlijke oppervlakte van ongeveer 250 cm<sup>2</sup>; de bijbehorende tak had een oppervlakte van ca. 30 cm<sup>2</sup>. De detectiegrenzen voor naalden, bladeren en haagbeuktakjes waren respectievelijk 0,016, 0,007 en 0,047 µg/cm<sup>2</sup>.

Na een bespuiting waren alle bomen in de haag 'belast' met de tracer. Voor een volgende bespuiting werden daarom schone, onbelaste takken van het desbetreffende gewas in de meetbomen geplaatst. Deze schone takken werden geplukt van bomen die buiten het proefveld waren opgesteld en deze waren dus vrij van BSF.

Om de totale oppervlakte aan naalden en bladeren per boom vast te stellen, werden enkele bomen na afloop van alle experimenten compleet geplukt.

### 3.3.4 Overig

Aan de voorkant van de bomenhaag werd op een hoogte van 1,5 m een reeks chromatografiepapiermpjes opgehangen met een onderlinge afstand van 1 m. Zij dienden alleen ter controle van de homogeniteit van de deeltjeswolk direct voor de bomenhaag. Een chromatografiepapiermje was 2,0 cm breed en ongeveer 15 cm lang; het werd bevestigd aan de uiteinden. Aangezien deze uiteinden mogelijk besmet konden worden met tracer tijdens het bevestigen, werd bij bemonstering alleen een middendeel van 10,0 cm uitgeknipt en in een zakje gedaan zonder aanraking met de handen. De collectoroppervlakte was dus 20,0 cm<sup>2</sup>. Papiermpjes werden gespoeld in 50 mL gedemineraliseerd water. De detectiegrens was ongeveer 0,003 µg/cm<sup>2</sup>.

## 3.4 Balansberekeningen

Voor het opstellen van de massabalans van de tracer worden een aantal berekeningen uitgevoerd. In principe wordt de totale hoeveelheid tracer die in de lucht voor de bomenhaag aanwezig is, verdeeld over de bomen (depositie op bladeren en takken), de grond onder de bomen (depositie) en de lucht achter de bomenhaag. De getransporteerde hoeveelheid fijnstof die per seconde een denkbeeldige doorsnede van 1 m<sup>2</sup> passeert wordt flux genoemd. De deeltjesflux op een bepaalde hoogte wordt berekend uit de stofconcentratie in de lucht en de gemiddelde windsnelheid bij die hoogte (zie Bijlage IV). Daarbij is alleen de component van de wind haaks op de bomenhaag van belang, dus de gemiddelde windsnelheid wordt gecorrigeerd voor gemiddelde windrichting. De hoeveelheid tracer in de lucht is de integraal van de flux met de hoogte, vermenigvuldigd met de meettijd (dat wil zeggen de tijd dat de vernevelaars in werking zijn).

De hoeveelheid tracer aan de voorkant van de bomenhaag werd bepaald tot een hoogte van 6,5 m. Voor een eerlijke vergelijking van de hoeveelheid tracer moest aan de achterzijde van de bomenhaag tot een grotere hoogte geïntegreerd worden. Welke hoogte dit moest zijn kon worden vastgesteld door te bepalen hoeveel lucht aan de voorzijde binnenstroomde tot een hoogte van 6,5 m. Aan de achterzijde moest dezelfde hoeveelheid lucht uitstromen. Omdat direct achter de bomen de gemiddelde windsnelheid lager was dan aan de voorzijde, en lucht zich niet ergens kon ophopen, moest er opstuwning plaatsvinden. Doordat de bomen ook takken hadden tot aan de grond, kon het onder de bomen door niet extra waaien en moest alle lucht door of over de bomen. Per experiment werd berekend wat de integratiehoogte aan de achterzijde moest zijn om de balans voor luchtverplaatsing sluitend te maken. Deze hoogte werd vervolgens ook gebruikt voor de berekening van de hoeveelheid stof in de lucht achter de bomen. De opstuwning is bij een aantal experimenten met een ultrasoon anemometer (METEK, USA-1) vastgesteld (zie par 3.2). De opgestuwde lucht bevat tracerdeeltjes maar de integratiehoogte die via opstuwning voor de luchtbalans wordt berekend, is lager dan de integratiehoogte die nodig is voor de berekening van de massabalans voor deeltjes.

Deze balans op basis van gelijke luchtverplaatsing houdt geen rekening met uitdijning (diffusie) van de stofwolk tussen voorste en achterste mast. Voor de metingen zonder bomen is een schatting te maken tot welke hoogte geïntegreerd zou moeten worden om rekening te houden met diffusie (zie Bijlage I): een integratie tot ca. 7,5 m voor de achterste mast bleek redelijk. Deze laatste methode is echter gebaseerd op theoretische aannames ten aanzien van het fluxprofiel met de hoogte en hoe dat verandert met de afstand vanaf de vernevelaars door uitdijning van de stofwolk. Bij de experimenten met bomen is echter onbekend wat de bijdrage van een dergelijke diffusie is, terwijl ook door opstuwning al een grotere integratiehoogte bij de achterste mast moet worden toegepast. Op basis van deze overwegingen werd besloten alleen de eerdergenoemde balans voor gelijke luchtverplaatsing toe te passen.

Uit de depositiewaarden op naalden, bladeren en takken was de totale hoeveelheid fijnstof te bepalen die door de bomen werd afgevangen, mits de totale oppervlakte aan naalden, bladeren en takken bekend zou zijn. De collectoren op de grond lagen precies tussen de mast voor en achter de bomenhaag, dus ook onder de bomen, en vormden zo de laatste voor de stofbalans benodigde post.

Er zijn verschillende manieren om de afvangcapaciteit van een bomenhaag te berekenen. Allereerst kan de hoeveelheid depositie op de bomen gerelateerd worden aan de hoeveelheid fijnstof die naar de bomen toe waait tot de totale hoogte van de mast, de 100% uit Figuur 1. Echter, een gedeelte van de fijnstofwolk waait de bomenhaag in.

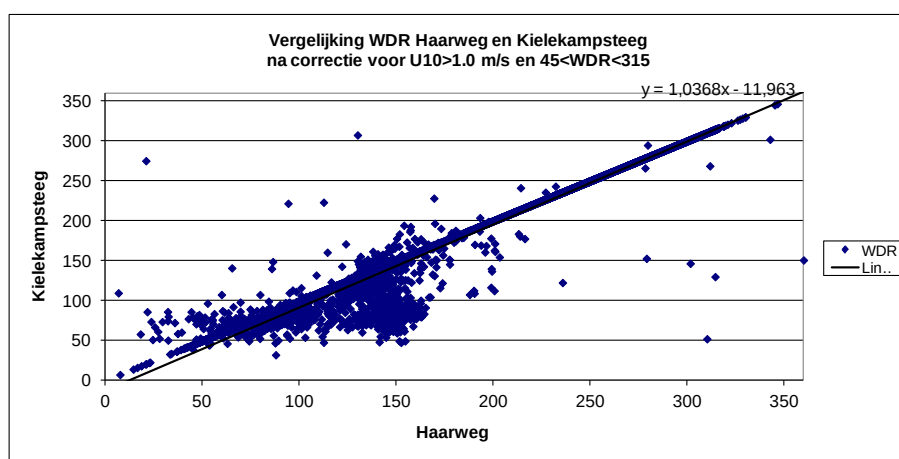
De depositie van de bomen kan ook gerelateerd worden aan de hoeveelheid stof die daadwerkelijk de bomenhaag in waait, omdat alleen dat fijnstof kan worden afgevangen.

In deze studie wordt de afvangcapaciteit van de bomenhaag berekend door de depositie op de bomen te relateren aan de stofwolk vlak voor de bomen tot aan de boomhoogte. Om de hoeveelheid die de bomen in waait te berekenen, moest de hoeveelheid stof in de lucht niet geïntegreerd worden over de gehele masthoogte, maar slechts tot de gemiddelde boomhoogte.

## 4. Resultaten

### 4.1 De windprofielen en de windrichting

De resultaten van de vergelijking tussen de ruw gemeten windrichting en de windrichting op de Haarweg zijn weergegeven in Figuur 12. Daarbij zijn de resultaten van windrichtingen rond het noorden uitgefilterd, omdat variaties rond het nulpunt (met sprongen in de overgang tussen 0° en 360°) het beeld vertroebelen. Daarnaast zijn alleen windsnelheden hoger dan 1,0 m/s gebruikt, omdat bij lagere windsnelheden de windrichting erg variabel is en in een vergelijking onbetrouwbaar wordt.



Figuur 12. Vergelijking van de windrichting gemeten op het meetveld voor de fijnstofexperimenten en gemeten op het meteorologisch meetveld Haarweg voor windsnelheden groter dan 1 m/s en windrichtingen tussen 45° en 315°.

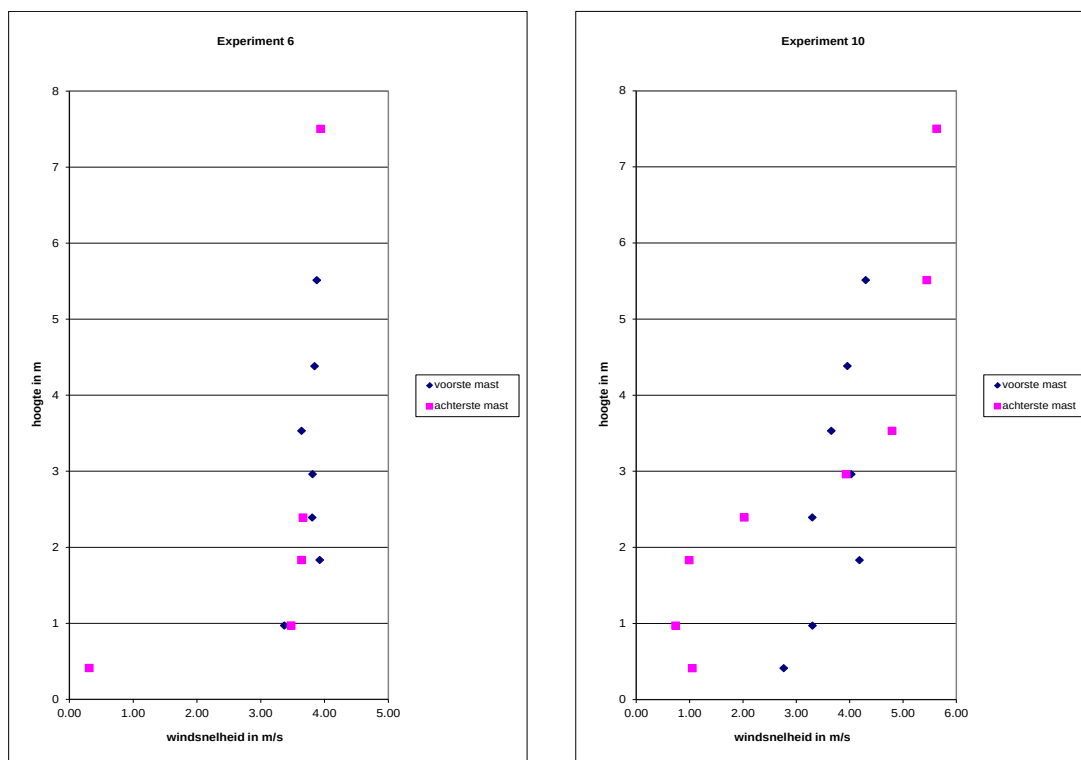
De windrichting op de proeflocatie wijkt iets af in vergelijking met de windrichting gemeten op de Haarweg (Figuur 12). De afwijkingen komen vooral tussen 75° en 160° voor en bedraagt ongeveer 12°. Mogelijke oorzaken zijn een rij hoge bomen aan de oostzijde van de gekozen proeflocatie (Figuur 7, links). De gemeten windrichting op de proeflocatie wordt daarom met 12° gecorrigeerd. Overigens lagen de voor de metingen bruikbare windrichtingen tussen 165° en 255° (zie Tabel 5, Par. 2.5), dus in het gebied zonder bovengenoemde afwijkingen.

Zonder haag moet het profiel voor de windsnelheden tussen de twee meetmasten gelijk zijn. In 2010 was het windprofiel tussen de twee meetmasten gelijk, de afwijkingen tussen de windprofielen voor en achter de beoogde haag viel binnen de standaard deviatie van de anemometers (zie bijlage VIII). In 2011 was dit anders, de profielen voor en achter de mast vertoonden een afwijking op 2 m hoog (Figuur 13). Op grond daarvan is besloten na de experimenten vergelijkende metingen op 1 hoogte uit te voeren met alle anemometers op een onderlinge afstand van 0,8 m om onderlinge beïnvloeding te vermijden en daar een correctiefactor uit af te leiden. Deze correctiefactoren worden gegeven in Tabel VIII. 1 van Bijlage VIII. Omdat de anemometers in 2010 waren geijkt en de nieuwe anemometers behalve de allerhoogste in de tweede mast zonder vegetatie regelmatige profielen gaven is er van uitgegaan dat alle anemometers uit de tweede mast behalve de bovenste gemiddeld de juiste windsnelheid zouden aangeven. Tegen dat gemiddelde zijn alle individuele anemometers afgezet volgens lineaire regressie. De correcties bedragen enkele procenten behalve voor de bovenste anemometer op mast 2 en de oude anemometers. Correcties kunnen daar oplopen tot zo'n 10%. De oude anemometers zijn in kwaliteit achteruit gegaan, zoals ook blijkt uit hun spreiding rond het gemiddelde van de 7 nieuwe en betrouwbare anemometers (Bijlage VIII). Daarmee neemt de onzekerheid in windsnelheid en afgeleide stoffluxen toe ten opzichte van de experimenten in 2010. De geschatte standaarddeviatie van de nieuwe anemometers (behalve de bovenste van mast 2) bedraagt 0,07 m/s. Voor de oude

anemometers en de bovenste nieuwe anemometer bedraagt deze 0,16 m/s. De bovenste anemometer van de voorste mast vertoonde een dusdanig onbetrouwbaar signaal, dat de waarden van deze meter niet in de berekeningen zijn gebruikt. Er is een schatting van deze waarden gemaakt door lineair tussen de op één na hoogste meting op de voorste mast en de (gecorrigeerde) hoogste meting op de achterste mast te interpoleren. Aanname is daarbij, dat de windsnelheid op het hoogste punt van de voorste mast en het hoogste punt van de achterste mast nauwelijks meer door de vegetatie zullen worden beïnvloed.

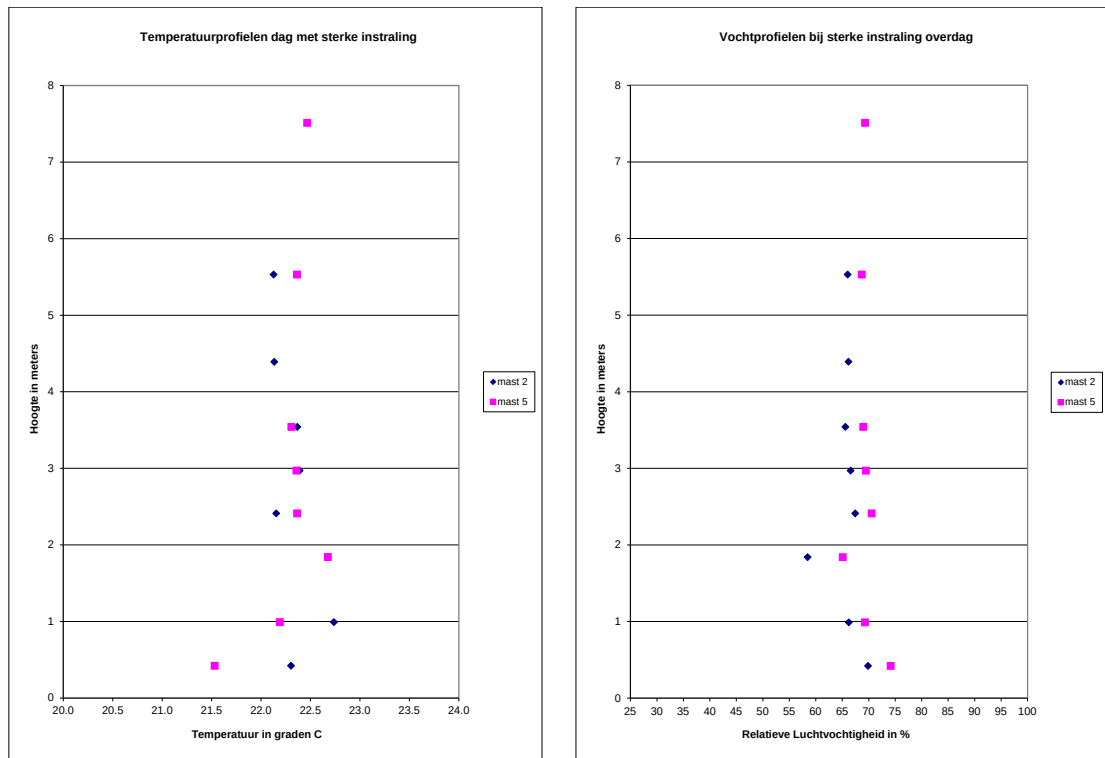
Als voorbeeld van een windprofiel zonder vegetatie wordt in Figuur 13 het windprofiel in experiment 6 (voorjaar 2011) getoond. Hierbij waren helaas enkele nieuwe anemometers nog niet aangesloten, zodat wat meetpunten ontbreken. Een ander voorbeeld is het windprofiel voor en achter de dennen in experiment 10. We zien hier duidelijk het patroon van sterke afname van de windsnelheid achter de vegetatie, wat afname van de windsnelheid net boven de toppen van de vegetatie en juist een toename van de windsnelheid op de achterste mast op die hoogte. De toename van de windsnelheid boven de vegetatie zet door tot omstreeks de hoogste meethoogte.

Temperatuur en relatieve luchtvochtigheid is in 2010 op alle meethoogten gemeten. Binnen de nauwkeurigheid van de meting waren er op dagen met sterke zonne-instraling kleine verschillen in temperatuur en luchtvochtigheid met de hoogte. Hetzelfde gold voor de relatieve luchtvochtigheid (Figuur 15). De verschillen waren te klein om in de berekeningen van de verdampingssnelheid rekening te hoeven houden. Om die reden werd in 2011 slechts op 2 meethoogten aan elke mast gemeten.



Figuur 13. Windsnelheidsprofielen in de hoogte voor experiment 6 (2011) zonder vegetatie en experiment 10 (2011) met grove den als groenscherm tussen de masten.





Figuur 14. Profielen van temperatuur en relatieve luchtvochtigheid in de hoogte op een dag met sterke instraling in 2010.

## 4.2 De veldexperimenten

De veldexperimenten zijn uitgevoerd op dagen met mooi weer (Tabel 8). Daarbij is allereerst afgegaan op de weersverwachting: de combinatie van windsnelheid, temperatuur en luchtvochtigheid moet voldoende droging van de druppels geven (zie ook Tabel 2 in Par. 2.1). Elk experiment is nagebootst met het simulatiemodel IDEFICS om een indruk te krijgen van de mate van droging en de globale deeltjesgrootte direct voor de bomen bij de gemeten weersomstandigheden. De laatste kolom in Tabel 8 geeft de op deze wijze berekende fractie droge deeltjes aan. Bij enkele experimenten (6 en 7) bleek de droging toch onder de grens van 80% te liggen. Dit betekent dat meer dan 20% van de stofwolk nog in druppelvorm aanwezig is. Deze druppels, die relatief groot zijn ten opzichte van de beoogde stofdeeltjes, zullen een merkbare verhoging in depositie op de grond en afvangst door de bomen te zien geven.

Ook bleek in sommige gevallen de gemiddelde windhoek iets groter dan de grenswaarde van 30° te zijn. Dit betekent niet dat die metingen onbruikbaar zijn, maar de resultaten worden mogelijk iets onnauwkeuriger. In totaal zijn 5 experimenten zonder bomen uitgevoerd. De experimenten met bomen bij een zekere BSF-concentratie zijn alle in drievoud uitgevoerd.

Tabel 8. *Overzicht van de veldexperimenten en de weersomstandigheden tijdens de bespuitingen.*

| Proef-nummer | Datum     | Gewas     | Concentratie BSF<br>[g/L] | Windhoek <sup>1</sup><br>[°] | Windsnelheid <sup>2</sup><br>[m/s] | Temperatuur <sup>3</sup><br>[°C] | RV <sup>3</sup><br>[%] | % deeltjes<br>droog |
|--------------|-----------|-----------|---------------------------|------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------|---------------------|
| 1            | 22-9-2010 | Geen      | 1,3                       | 27                           | 1,8                                | 20,6                             | 64                     | 86                  |
| 2            | 22-9-2010 | Geen      | 1,3                       | 34                           | 2,1                                | 22,3                             | 58                     | 86                  |
| 3            | 23-9-2010 | Geen      | 1,3                       | 33                           | 0,6                                | 19,5                             | 73                     | 99                  |
| 4            | 29-9-2010 | Grove den | 1,3                       | -22                          | 2,5                                | 14,3                             | 56                     | 72                  |
| 5            | 1-10-2010 | Grove den | 1,3                       | -36                          | 2,9                                | 16,2                             | 76                     | 46                  |
| 6            | 20-4-2011 | Geen      | 1,3                       | 20                           | 3,9                                | 22,5                             | 25                     | 94                  |
| 7            | 20-4-2011 | Geen      | 1,3                       | 25                           | 3,4                                | 23,1                             | 25                     | 100                 |
| 8            | 30-5-2011 | Grove den | 1,3                       | -24                          | 4,2                                | 22,8                             | 46                     | 81                  |
| 9            | 30-5-2011 | Grove den | 0,4                       | -19                          | 4,6                                | 26,1                             | 32                     | 89                  |
| 10           | 30-5-2011 | Grove den | 0,4                       | -6                           | 4,1                                | 27,3                             | 28                     | 94                  |
| 11           | 15-6-2011 | Grove den | 0,4                       | 9                            | 2,0                                | 21,3                             | 63                     | 97                  |
| 12           | 15-6-2011 | Grove den | 0,1                       | 34                           | 2,8                                | 22,6                             | 58                     | 89                  |
| 13           | 27-6-2011 | Haagbeuk  | 1,3                       | -21                          | 3,4                                | 26,8                             | 53                     | 90                  |
| 14           | 27-6-2011 | Haagbeuk  | 1,3                       | -21                          | 4,6                                | 28,5                             | 40                     | 85                  |
| 15           | 27-6-2011 | Haagbeuk  | 1,3                       | 0                            | 4,2                                | 30,3                             | 35                     | 92                  |
| 16           | 5-7-2011  | Grove den | 0,1                       | 21                           | 1,7                                | 21,3                             | 59                     | 100                 |
| 17           | 5-7-2011  | Grove den | 0,1                       | 27                           | 1,8                                | 23,3                             | 49                     | 100                 |

<sup>1</sup> Windhoek ten opzichte van haaks op de bomenhaag.

<sup>2</sup> Op 2 meter hoog, voor de bomenhaag.

<sup>3</sup> Meteostation Haarweg.

## 4.3 Resultaten van de verschillende balansposten

### 4.3.1 Experimenten zonder bomen

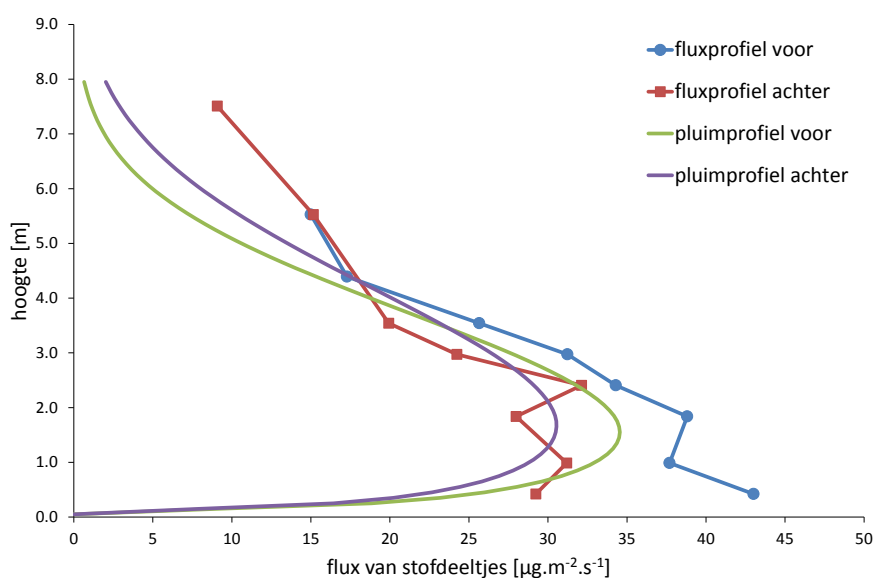
Voor de experimenten zonder bomen is de massabalans eenvoudig: de totale hoeveelheid stof in de lucht bij de voorste mast moet gelijk zijn aan de som van de hoeveelheid in de lucht bij de achterste mast en de hoeveelheid die op de grond tussen de masten terecht komt. Tabel 9 toont de diverse posten in de massabalans voor elk van de experimenten zonder bomen, waarbij alle hoeveelheden genormeerd zijn op de hoeveelheid stof in de lucht bij de voorste mast (deze is dus op 100% gesteld). Daarbij is geïntegreerd tot een hoogte van 6,5 m, zowel voor de voorste als voor de achterste mast, aangezien de windprofielen in deze situatie zonder gewas in principe gelijk moeten zijn. Het bleek dat de massabalansen niet sluitend waren, maar in 4 van de 5 gevallen was er een tekort op de balans. Dat wil zeggen dat bij de achterste mast en op de grond samen minder terug gevonden werd dan er bij de voorste mast in de lucht aanwezig was. Opvallend is een duidelijk negatief tekort (een overschot dus) bij het eerste experiment, terwijl de andere experimenten een positief tekort laten zien. Gemiddeld is het tekort ongeveer 10%. Indien rekening gehouden zou worden met een uitdijning van de stofwolk tussen voorste en achterste mast (zie Bijlage I), dan zou de achterste mast geïntegreerd moeten worden tot een hoogte van 7,5 m. De hoeveelheid op de achterste mast neemt dan toe en het tekort neemt af tot een gemiddelde van ca. 5%. De ruime spreiding in de afzonderlijke tekorten per experiment blijft echter bestaan.

Tabel 9. Overzicht van de massabalans bij de experimenten zonder bomen, uitgedrukt in percentages van de totale hoeveelheid tracer in de lucht bij de voorste mast.

| Proefnummer | Massa voor [%] <sup>1</sup> | Massa achter [%] | Massa op grond [%] | Tekort [%] |
|-------------|-----------------------------|------------------|--------------------|------------|
| 1           | 100                         | 125              | 5                  | -30        |
| 2           | 100                         | 74               | 5                  | 21         |
| 3           | 100                         | 79               | 3                  | 18         |
| 6           | 100                         | 85               | 2                  | 13         |
| 7           | 100                         | 72               | 2                  | 26         |

<sup>1</sup> Per definitie op 100% gesteld.

In par.3.1 is berekend hoeveel tracer per experiment werd uitgebracht: 0,22, 0,87 en 2,84 g/m voor beginconcentraties BSF in de spuitvloeistof van resp. 0,1, 0,4 en 1,3 g/L. De experimenten zonder bomen zijn uitgevoerd bij de hoogste BSF-concentratie, dus uitgebracht is 2,84 g/m. De integraal tot 6,5 m over de deposities op de filters van de voorste mast gaven een duidelijk lagere hoeveelheid BSF in de lucht. Gemiddeld bleek ongeveer 20% van de uitgebrachte hoeveelheid tracer bij de voorste mast aan te komen. Dit percentage bleek vooral af te hangen van de relatieve luchtvochtigheid: een hogere luchtvochtigheid gaf een lagere fractie bij de voorste mast, en omgekeerd. Dit ondersteunt de aannemelijke veronderstelling dat de ontbrekende 80% grotendeels als druppeltjes op de grond is terecht gekomen, ergens tussen vernevelaars en voorste mast. Bij de berekeningen van de fluxprofielen volgens het pluimmodel (Bijlage I) is sedimentatie ten gevolge van zwaartekracht verwaarloosd. Dit mag alleen als de stofdeeltjes erg klein zijn. In de experimenten was dit echter niet het geval: de initiële druppelgroottes bij de vernevelaars zijn dusdanig groot dat sedimentatie zeker een rol heeft gespeeld. In Figuur 15 zijn de diverse fluxprofielen met de hoogte te zien, zoals bepaald uit de depositiemetingen op de filters en berekend met het pluimmodel. De met het pluimmodel berekende fluxen zijn daarbij vermenigvuldigd met een factor 0,2 in overeenstemming met de bovengenoemde 20% die bij de voorste mast aankomt.



Figuur 15. Fluxprofielen van stofdeeltjes in de lucht bij voorste en achterste mast; gemeten profielen en berekende profielen. Metingen zonder bomen.

De fluxprofielen uit de filtermetingen zijn gemiddelden over alle 5 experimenten zonder bomen, voor voorste en achterste mast. Gemeten en berekende profielen komen ruwweg met elkaar overeen, ook al zijn er verschillen. Zo is de gemeten flux dicht bij de grond duidelijk groter dan die berekend met het model. Dit is waarschijnlijk nog een gevolg van sedimentatie waardoor het centrum van de stofwolk dichter bij de grond komt te liggen. Op grotere hoogte (>5 m) lijken de metingen ook hogere waarden aan te geven dan het model. Mogelijk is de coëfficiënt voor verticale spreiding in het pluimmodel iets te klein ingeschat.

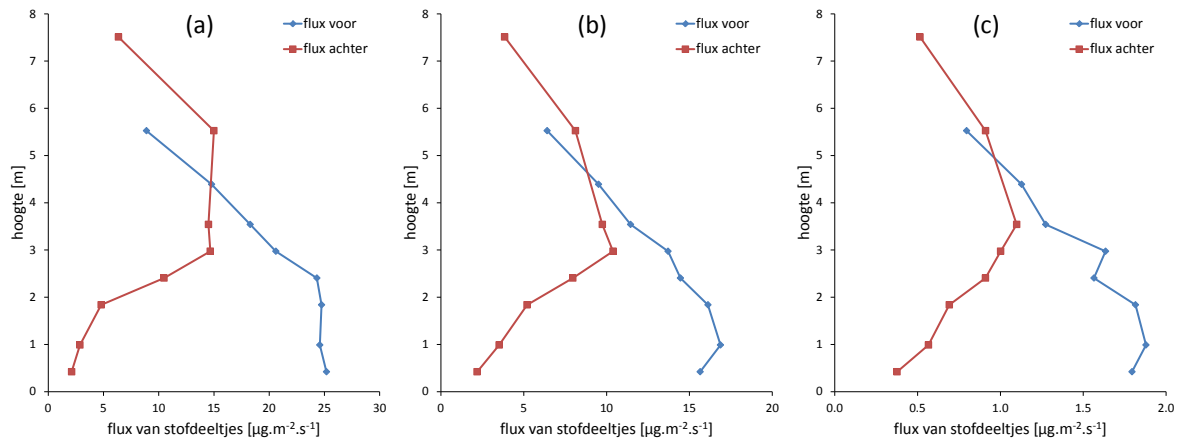
### 4.3.2 Depositie op de filters

De gemeten deposities op de filters werden omgerekend tot fluxen (Par. 3.4), voor de voorste en achterste mast afzonderlijk. Voor windrichting is gecorrigeerd zoals beschreven in Bijlage IV. In principe werd voor alle filters de gemiddelde windrichting gehanteerd zoals op grotere hoogte (ca. 10 m) was gemeten. Twee verfijningen werden aangebracht. Ten eerste werd bij de experimenten waarbij met de ultrasoon anemometer ook de windrichting vlak voor de bomen was gemeten, deze laatste windrichting gebruikt, maar alleen voor de filters aan de voorzijde tot de boomhoogte. Zodoende kon, waar mogelijk, rekening gehouden worden met een afwijkende windrichting direct voor de bomen als gevolg van het stuwende effect van de bomen zelf. Ten tweede werd verondersteld dat de lucht die door de bomenhaag passeerde nagenoeg loodrecht uit de haag zou komen. Daarom werd voor de filters aan de achterzijde, tot boomhoogte, een windrichting haaks op de bomen genomen (dus windrichting nul). Voor de experimenten met haagbeuk werd de eerste verfijning niet toegepast, aangezien de bomen vrij open waren en minder effect op de windrichting zouden hebben. De tweede verfijning werd wel bij haagbeuk toegepast.

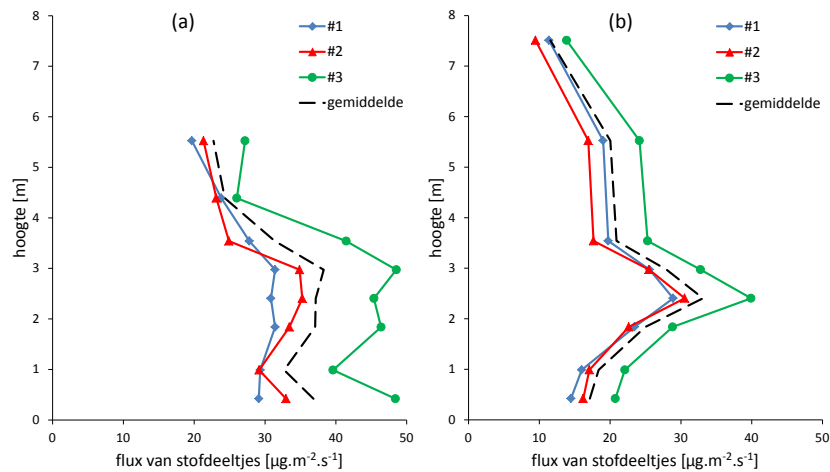
De flux direct achter de bomenhaag was duidelijk lager dan ervoor, door lagere depositie van BSF-stof op de filters, maar vooral door de sterke daling van windsnelheid achter de bomen. In Figuur 16 zijn voor de drie BSF-concentraties de fluxprofielen met de hoogte te zien, voor en achter een bomenhaag van grove den. Elke curve is het gemiddelde van drie experimenten. In (a) zijn de curves te zien bij BSF-concentratie van 1,3 g/L, dus voor relatief grote stofdeeltjes. In Figuur (b) en (c) zijn de resultaten te zien voor resp. 0,4 en 0,1 g/L BSF, ofwel middelgrote en kleinere stofdeeltjes. De totaal uitgebrachte massa BSF neemt af van (a) naar (c), zie Par. 3.1. Dat is direct te zien aan het globale niveau van de fluxen in de drie situaties. Qua vorm van de fluxprofielen verschillen de drie situaties echter niet veel. Tot boomhoogte is de flux aan de voorzijde relatief constant met de hoogte, daarboven neemt de flux snel af. De flux aan de achterzijde van de bomen begint dicht bij de grond laag en neemt geleidelijk toe met de hoogte. De hoogste waarde wordt bereikt op een hoogte van ruwweg 3 à 4 m, dus ruim boven de bomen. Voor grotere hoogtes (>5 m) is de flux achter de bomen hoger dan die voor de bomen. Deze effecten duiden erop dat er opstuwung van lucht met stof moet plaatsvinden.

Bij het hoogste meetpunt voor en achter de bomen is de flux nog niet tot nul gedaald. Voor bepaling van de afvangefficiëntie is dat niet van belang, aangezien dan alleen naar de integraal van de flux tot boomhoogte wordt gekeken. Ook voor de massabalans is het van ondergeschikt belang, aangezien de balans is gebaseerd op gelijke luchtverplaatsing (zie Par. 3.4). Het geringe niet gemeten deel van de wolk aan de voorzijde wordt immers gecompenseerd door een even groot niet gemeten deel aan de achterzijde (afgezien van mogelijk wat extra massa die door stuwing en pluimuitbreiding boven het laatste meetpunt passeert).

De experimenten met haagbeuk zijn alleen bij een BSF-concentratie van 1,3 g/L uitgevoerd. Figuur 17 toont de fluxprofielen voor (a) en achter (b) de bomenhaag voor de drie experimenten en hun gemiddelde. De flux aan de voorzijde van de haagbeuk had een betrekkelijk vlak verloop tot ca. 3 m hoogte. Aan de achterzijde begint de flux onderaan laag en stijgt met toenemende hoogte. Dit verloop is minder sterk dan bij grove den (Figuur 16-a), waarschijnlijk omdat de haagbeuk minder dicht is dan de grove den. Er is een opvallend sterke piek in de flux net boven de bomen, waarboven de flux snel afneemt met de hoogte. De hoogte waarop de piekwaarde optreedt, is lager dan bij de grove den en duidelijker afgebakend. Dit duidt erop dat ook hier opstuwung optreedt van de lucht met stof, maar de opstuwung is minder sterk doordat de haagbeuk minder dicht is dan de grove den. Dit wordt ondersteund door de constatering dat de flux op het hoogste punt aan de voorzijde (ca. 5,5 m) niet lager is dan die op overeenkomstige hoogte achter de bomen, zoals wel het geval was bij de grove den.



*Figuur 16. Fluxprofielen van stofdeeltjes in de lucht voor en achter een bomenhaag van grove den. Bij verschillende BSF-concentraties: (a) 1,3 g/L; (b) 0,4 g/L; (c) 0,1 g/L. Alle curves zijn gemiddelde van drie herhalingen.*

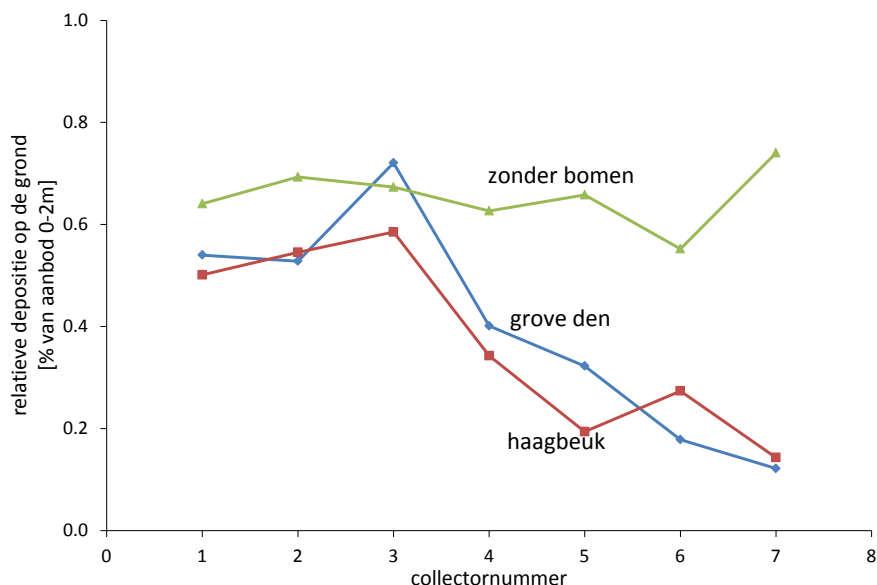


*Figuur 17. Fluxprofielen van stofdeeltjes in de lucht voor en achter een bomenhaag van haagbeuk. Bij BSF-concentraties 1,3 g/L; (a) profielen aan voorzijde; (b) profielen aan achterzijde; elke curve representeert een experiment; gestreepte curve is gemiddelde van de drie experimenten.*

### 4.3.3 Depositie op de bodem

Tussen de mast voor en achter de bomenhaag liggen 7 collectoren om de depositie op de grond vast te kunnen stellen. Enerzijds is dit noodzakelijk om een juiste massabalans te kunnen maken, anderzijds geeft dit ook extra informatie over de invloed van de bomenhaag op het transport van de stofdeeltjes. Figuur 18 toont het verloop van de depositie over de 7 collectoren, gemiddeld voor de situaties zonder bomen, met grove den en met haagbeuk. De experimenten met onvoldoende droging van de deeltjes zijn weggelaten; deze geven namelijk een duidelijk hogere depositie op de eerste collectoren, aangezien de aanwezige druppels sneller uitzakken naar de grond. Bij de grove den is geen onderscheid gemaakt tussen de experimenten met verschillende deeltjesgroottes. De collectoren 1 en 2 liggen ruwweg voor de bomen, collectoren 3 t/m 5 onder de bomen en 6 en 7 achter de bomen. Het kwalitatieve beeld is duidelijk: wanneer er geen bomen staan, is de depositie op de bodemcollectoren ongeveer gelijk. In theorie moet de depositie iets afnemen, maar dat is niet significant waarneembaar in de metingen. Wanneer er bomen staan, wordt de luchtstroming vlak voor en tussen de bomen sterk afgeremd. Onder de voorste boom treedt verhoogde depositie op, hetzij door uitzakken van stof in nagenoeg stilstaande lucht, hetzij door een neerwaartse stroming van de met stof beladen lucht onder de bomen door, waar relatief weinig takken zijn. Verder het gewas in

neemt de depositie snel af, enerzijds door het filterende effect van de bomen, anderzijds doordat een deel van de stofwolk opgestuwd wordt en over de bomen heen gaat. Het deel van de stofwolk dat daadwerkelijk de bomenrij in vliegt zal daardoor een verlaagde concentratie moeten hebben. Er is geen significant verschil in de depositiepatronen voor grove den of haagbeuk.



*Figuur 18. Relatieve depositie op de grond tussen voorste en achterste mast, als percentage van hoeveelheid stof in de lucht tot boomhoogte.*

#### 4.3.4 Depositie op het gewas

Dennenbomen hebben 3,5 tot 5,1 m<sup>2</sup> blad per boom terwijl haagbeuk 1,2 m<sup>2</sup> blad per boom heeft (Tabel 10). De plantdichtheid van de bomen was verschillend en daardoor werd het verschil tussen de boomsoorten kleiner wanneer het gemiddeld aantal bladlagen per grondoppervlak ('leaf area index', LAI) vergeleken werden.

In Tabel 6 (Par. 3.1) werden effectieve hoogte, breedte en diepte van een boom genoemd. Het product van deze drie grootheden is het globale volume per boom in de bomenhaag. De 'leaf area density' (LAD) wordt gedefinieerd als de totale oppervlakte aan bladeren en takken per m<sup>3</sup> boomvolume; zie Tabel 10.

*Tabel 10. De blad- en takoppervlakte (m<sup>2</sup>/boom) van de verschillende boomsoorten en de totale oppervlakte per boom.*

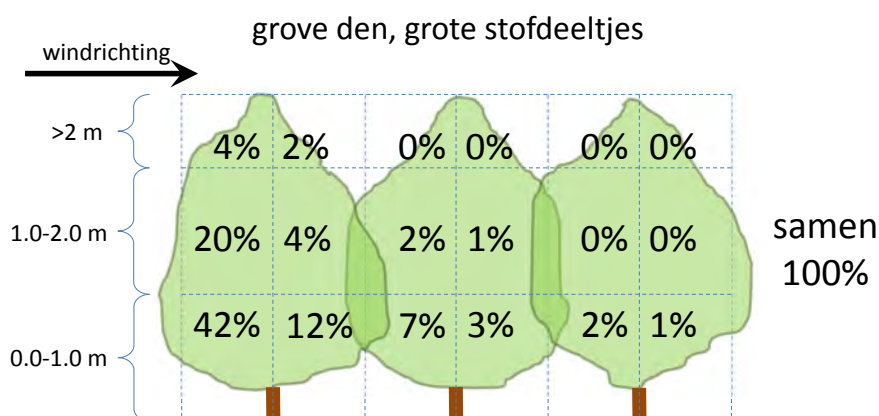
| Boomsoort  | Jaar | Bladoppervlakte<br>[m <sup>2</sup> ] | Takoppervlakte<br>[m <sup>2</sup> ] | Totale oppervlakte<br>[m <sup>2</sup> ] | LAD<br>[m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ] |
|------------|------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| Dennenboom | 2010 | 3,5                                  | 0,5                                 | 4,0                                     | 1,75                                     |
| Dennenboom | 2011 | 5,1                                  | 0,7                                 | 5,8                                     | 2,53                                     |
| Haagbeuk   | 2011 | 1,2                                  | 0,2                                 | 1,3                                     | 1,49                                     |

De relatieve verdeling van afgevangen stof in de bomen voor grove den bij de grotere stofdeeltjes is te zien in Figuur 19, gemiddeld over de drie experimenten bij deze situatie. Gemiddeld 84% van de afvangst vond als in de eerste boom plaats (waarvan het grootste deel op de voorste helft: 66%); de tweede boom was goed voor 13% en de derde boom (rechts) voor de laatste 3% (zie ook Tabel 11). Voor middelgrote stofdeeltjes bij een haag met grove den ving de eerste rij iets minder af (57%), ten gunste van de middelste en achterste rij. Hetzelfde beeld was te zien bij haagbeuk en grotere stofdeeltjes. Zoals al eerder vermeld, was bij de experimenten met grotere deeltjes en een haag van grove den de droging niet optimaal (Par. 4.2). Bij het bereiken van de eerste bomenrij waren er vermoedelijk nog druppeltjes in de wolk aanwezig. Deze zijn groot ten opzichte van droge stofdeeltjes en de kans op botsing met de eerste bomenrij is dan ook relatief groot. Dit verklaart de hoge afvangst in de eerste rij.

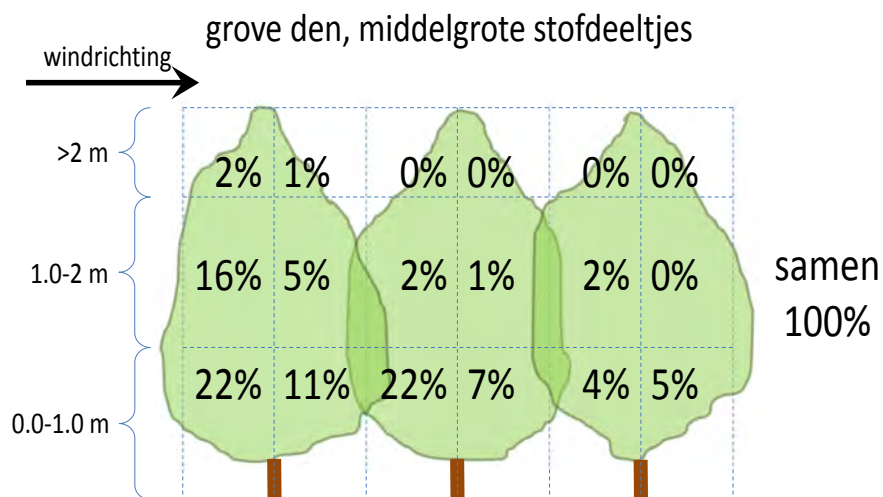
Hoewel de verdeling over de rijen in de situaties met grove den en middelgrote deeltjes vergelijkbaar leek met die voor haagbeuk en grotere stofdeeltjes (Tabel 11), was de verdeling opgesplitst naar hoogte toch duidelijk verschillend (Figuur 20 en Figuur 21). Bij de haagbeuk lag de afvangst in de 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> bomenrij bovenin, in het midden en onderin in dezelfde orde van grootte. Voor de grove den vond de afvangst vooral plaats onderin de bomen.

Tabel 11. Verdeling van afvangst over de verschillende bomenrijen.

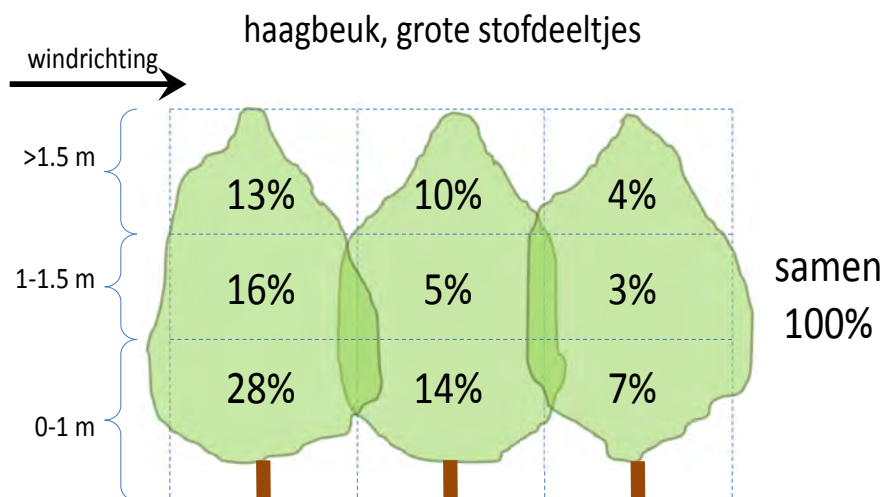
| Boomsoort | Deeltjesgrootte | Percentage afvangst per bomenrij<br>[% van totale afvangst] |        |        |
|-----------|-----------------|-------------------------------------------------------------|--------|--------|
|           |                 | Voor                                                        | Midden | Achter |
| Grove den | Groot           | 84                                                          | 13     | 3      |
|           | Middelgroot     | 57                                                          | 32     | 11     |
|           | Klein           | –                                                           | –      | –      |
| Haagbeuk  | Groot           | 57                                                          | 29     | 14     |



Figuur 19. Verdeling van afgevangen stof in de bomen; voor grove den bij de grotere stofdeeltjes. Bomen zijn verdeeld in 3 hoogtes en voor- en achterkant; wind waait van links naar rechts.



*Figuur 20. Verdeling van afgevangen stof in de bomen; voor grove den bij de middelgrote stofdeeltjes. Bomen zijn verdeeld in 3 hoogtes en voor- en achterkant; wind waait van links naar rechts.*



*Figuur 21. Verdeling van afgevangen stof in de bomen; voor haagbeuk bij de middelgrote stofdeeltjes. Bomen zijn verdeeld in 3 hoogtes; wind waait van links naar rechts.*

#### 4.3.5 Massabalans

De massabalans voor fijnstof bij de experimenten met de grove den bij grote stofdeeltjes (BSF-concentratie 1,3 g/L; experimenten 4, 5 en 8) is te zien in Figuur 22. Van de totale hoeveelheid fijnstof die voor de bomenhaag in de lucht aanwezig is, wordt gemiddeld 18% door de bomen afgevangen. Op de grond tussen de voorste en achterste mast komt 5% terecht, en achter de bomen is in de lucht nog 63% aanwezig. Op de balans ontbreekt zodoende 14% fijnstof dat niet teruggevonden werd. Bij de experimenten zonder bomen werd gemiddeld 10% fijnstof niet teruggevonden (zie Par. 4.3.1). Dit laatste percentage kan als maat voor de nauwkeurigheid van de toegepaste methode gezien worden. Het onverklaarde deel van 15% wijkt hier niet veel van af.

Van alle voor de bomenhaag in de lucht aanwezige stof waait 45% recht op de bomen af. De afvang efficiëntie van de bomen is dan  $18/45 \times 100\%$  ofwel ca. 39%. Dit hoge percentage wordt mede veroorzaakt doordat een aanzienlijk deel van de druppeltjes nog niet opgedroogd is wanneer ze de bomen bereiken (zie ook Tabel 8, experiment 4 en 5). Zelfs bij experiment 8, dat voldoet aan de norm van 80% droging, is de afvang efficiëntie van 34% vermoedelijk te hoog door de bijdrage van druppeltjes aan de depositie op de bomen.



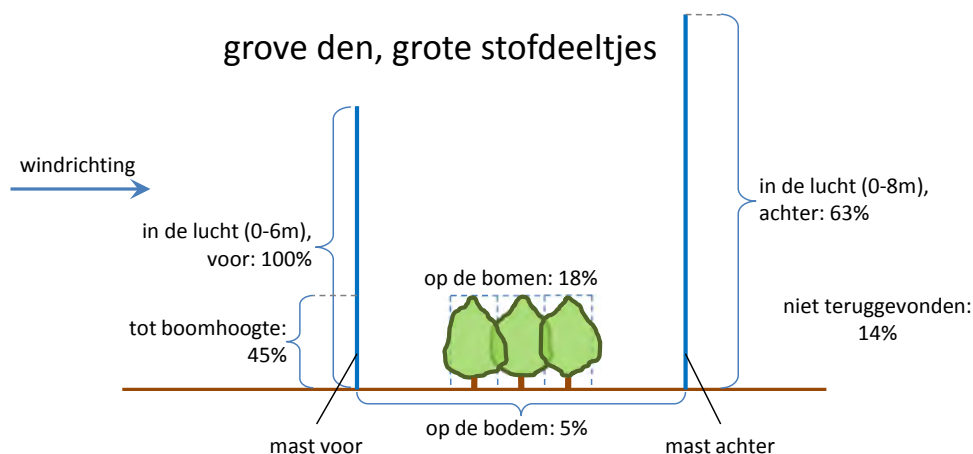
Figuur 23 en Figuur 24 tonen een soortgelijke massabalans voor grove den bij respectievelijk middelgrote en kleine stofdeeltjes (0,4 en 0,1 g/L BSF). De door de bomen afgevangen fractie van middelgrote stofdeeltjes bedraagt ca. 4% van de totale hoeveelheid fijnstof voor de bomen in de lucht. Op basis van de hoeveelheid die direct op de bomen afkomt (46%), is de afvangkans voor middelgrote deeltjes  $4/46 \times 100\%$  ofwel ca. 10%. Van de kleine stofdeeltjes kon niet worden vastgesteld dat de bomen ze af konden vangen (afvangpercentage 0%). De niet teruggevonden fracties zijn voor middelgrote en klein deeltjes betrekkelijk hoog: 29-39%. Deze percentages liggen duidelijk hoger dan de bovengenoemde onnauwkeurigheid van 10% op basis van de experimenten zonder bomen.

Bij experiment 16 werd een negatieve hoeveelheid fijnstof op de bomen vastgesteld. Dat is natuurlijk niet mogelijk; het geeft aan dat de depositie onder de detectiegrens lag. Negatieve waarden kunnen, bij deposities rondom de detectiegrens, worden verkregen door mogelijk kleine afwijkingen in de hoeveelheden herwinbare tracer, of wanneer de gemeten fluorescentiewaarden na correcties voor water en blanco collectoren net onder nul komen te liggen (zie ook vgl.(1) in Par. 3.3).

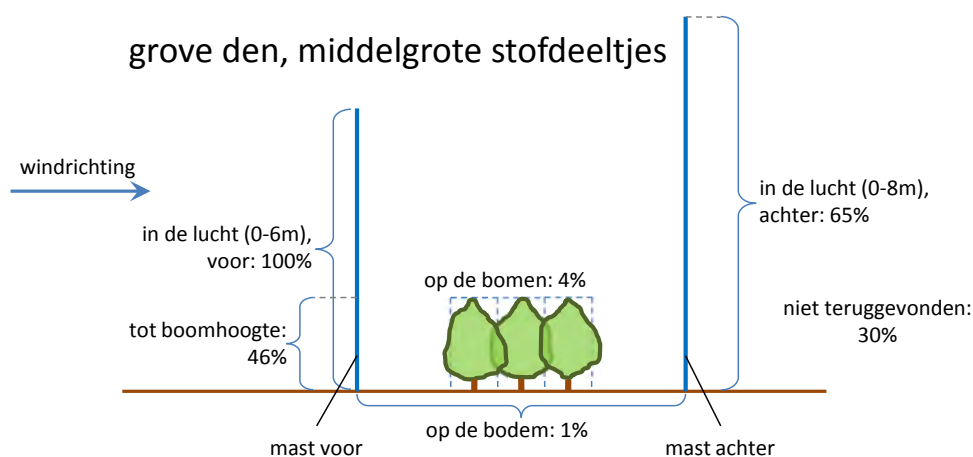
*Tabel 12. Overzicht van de massabalansen per experiment, in percentages van totale hoeveelheid bij de voorste mast in de lucht aanwezig (tot integratiehoogte).*

| Proef-nummer | Gewas     | Massa voor | Massa achter | Massa op gewas | Massa op grond | Tekort          | Massa voor tot boomhoogte | Afvangefficiëntie tot boomhoogte |
|--------------|-----------|------------|--------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------------|----------------------------------|
| 4            | Grove den | 100        | 60           | 19             | 7              | 14              | 49                        | 40                               |
| 5            | Grove den | 100        | 61           | 20             | 7              | 11              | 47                        | 44                               |
| 8            | Grove den | 100        | 66           | 14             | 2              | 19 <sup>1</sup> | 40                        | 34                               |
| 9            | Grove den | 100        | 65           | 5              | 1              | 29              | 46                        | 11                               |
| 10           | Grove den | 100        | 61           | 6              | 1              | 33              | 43                        | 13                               |
| 11           | Grove den | 100        | 68           | 2              | 1              | 29              | 49                        | 5                                |
| 12           | Grove den | 100        | 62           | 2              | 2              | 35              | 50                        | 4                                |
| 16           | Grove den | 100        | 63           | 0              | 1              | 39              | 37                        | 0                                |
| 17           | Grove den | 100        | 68           | 2              | 1              | 29              | 42                        | 5                                |
| 13           | Haagbeuk  | 100        | 79           | 6              | 1              | 14              | 37                        | 16                               |
| 14           | Haagbeuk  | 100        | 72           | 5              | 1              | 22              | 37                        | 13                               |
| 15           | Haagbeuk  | 100        | 73           | 3              | 1              | 24              | 39                        | 7                                |

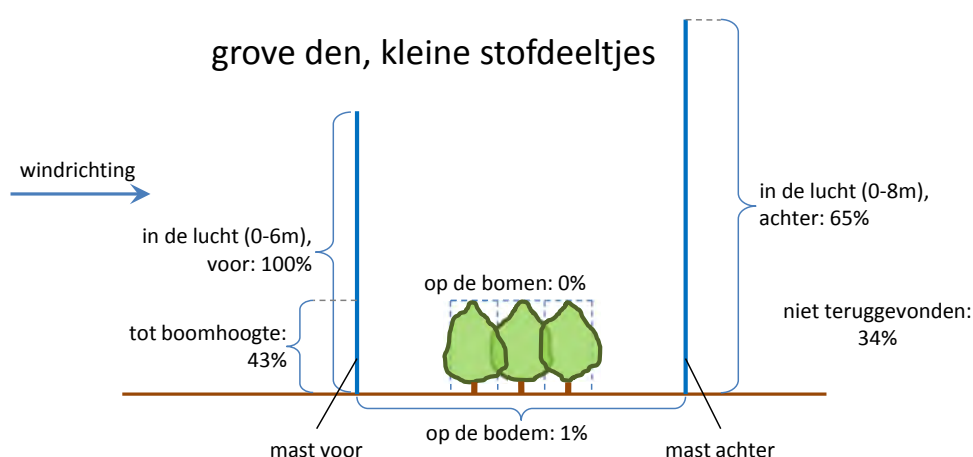
<sup>1</sup> Door afronding op hele getallen kan de som afwijken van 100%.



Figuur 22. De berekende balans voor de experimenten met de grote stofdeeltjes in grove den.



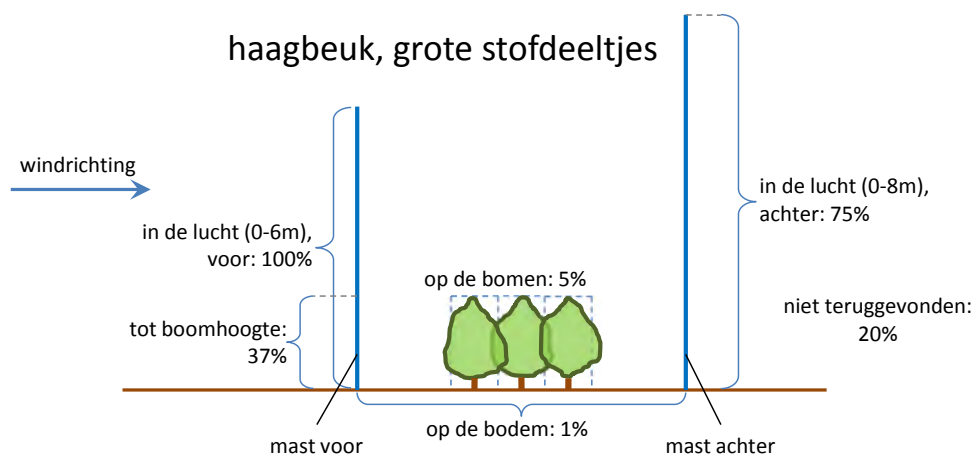
Figuur 23. De berekende balans voor de experimenten met de middelgrote stofdeeltjes in grove den.



Figuur 24. De berekende balans voor de experimenten met de kleine stofdeeltjes in grove den.

Voor de haagbeuk zijn alleen experimenten met grote stofdeeltjes uitgevoerd. Figuur 25 toont de bijbehorende massabalans. De bomen vangen gemiddeld 5% af van het totaal aan fijnstof voor de bomen aanwezig. Op basis van

de direct toestromende fractie (37%) is de bijbehorende afvangkans  $5/37 \times 100\%$  ofwel ca. 12%. De niet teruggevonden fractie (20%) is iets hoger dan de eerder genoemde onnauwkeurigheidsmarge van ongeveer 10%. In vergelijking tot de grove den is de afvangkans voor haagbeuk dus lager.



Figuur 25. De berekende balans voor de experimenten met de grote stofdeeltjes in haagbeuk.

De dennen vingen in absolute zin meer stof af dan de haagbeuken bij gelijke deeltjesgroottes. Algemeen wordt aangenomen dat naaldbomen effectiever zijn in het afvangen van deeltjes dan loofbomen (Freer Smith *et al.* 2005). In de experimenten had de grove den een beduidend grotere oppervlakte aan bladeren en takken dan de haagbeuk (zie LAD in Tabel 10). Men kan zich dan ook afvragen of de hogere afvangst bij grove den alleen een gevolg is van de grotere hoeveelheid oppervlakte, of dat naalden intrinsiek efficiënter zijn dan bladeren in het afvangen van stofdeeltjes. Hiervoor moet de gemeten afvangst vergeleken worden met de LAD. In Bijlage VII wordt een eenvoudig model beschreven waarin afvangst en LAD gerelateerd worden. De diepte van de bomenhaag is 3x de afstand tussen twee rijen (zie Tabel 6, Par. 3.1). De inkomende flux direct voor de bomen is de fluxintegraal tot boomhoogte; de totale afvangst in de bomenhaag wordt gerelateerd aan dit aanbod en is hierboven berekend (resp. 39, 10 en 12% voor de drie gevallen in Tabel 13). Hieruit is direct hun quotiënt  $\Phi_{afv}/\Phi_0$  te bepalen. Met behulp van vgl.(VII.3) is de parameter  $p$  uit te rekenen voor elk experiment. Verder is daarbij de LAD nodig; voor grove den was deze in 2010 gelijk aan  $1,75 \text{ m}^{-1}$  (experiment 4 en 5), en in 2011 was deze  $2,53 \text{ m}^{-1}$  (zie Tabel 10). Onderstaande Tabel 13 geeft gemiddelde waarde van  $p$  voor grove den bij grote en middelgrote stofdeeltjes en voor haagbeuk bij grote stofdeeltjes. Bij kleine stofdeeltjes ving de haag geen significante hoeveelheid stof af, dus is een bepaling van  $p$  niet zinvol. Uit de berekeningen blijkt dat bij het afvangen van grotere stofdeeltjes de  $p$ -waarde voor grove den groter is dan voor haagbeuk. Dit betekent inderdaad dat, gecorrigeerd voor LAD, de naaldboom beter presteert dan de loofboom. Weliswaar speelt ook hier (via het quotiënt  $\Phi_{afv}/\Phi_0$ ) de verhoogde afvangst door de aanwezigheid van druppeltjes in experimenten 4 en 5 nog een rol, waardoor de berekende waarde voor  $p$  van 0,079 wellicht ook te hoog is. In het eenvoudige model is geen rekening gehouden met depositie op de grond onder de bomen of met verdunning van de concentratie door opstuwung. Dit kan de waarden van  $p$  enigszins beïnvloeden, maar de rangschikking zal hierdoor niet veranderen.

Tabel 13. Berekening van intrinsieke factor  $p$  voor afvangst van stofdeeltjes in de bomenhaag.

| Boomsoort | Deeltjesgrootte | Diepte van bomenhaag<br>[m] | Relatieve afvangst ( $\Phi_{afv}/\Phi_0$ )<br>[fractie van aanbod tot boomhoogte] | P<br>[-] |
|-----------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Grove den | Groot           | 3,3                         | 0,39                                                                              | 0,079    |
|           | Middelgroot     | 3,3                         | 0,10                                                                              | 0,012    |
| Haagbeuk  | Groot           | 2,0                         | 0,12                                                                              | 0,042    |

### 4.3.6 Opstuwing

In Par. 3.4 is beschreven hoe de methode van luchtbalans wordt toegepast om de integratiehoogte van de achterste mast te bepalen. Voor de voorste mast werd een effectieve hoogte van 6,5 m aangehouden. Voor de achterste mast moet een grotere hoogte gehanteerd worden voor dezelfde luchtverplaatsing. Het per experiment berekende hoogteverschil  $\Delta H$  staat in Tabel 14. Voor de experimenten met grove den is dit hoogteverschil gemiddeld 0,89 m, voor haagbeuk 0,45 m. De beide masten staan 7,0 m uit elkaar. De gemiddelde opstuwing wordt dan gegeven als de hellingshoek van het punt van de voorste mast op hoogte 6,5 m naar de achterste mast op hoogte  $6,5 + \Delta H$ . Deze hellingshoek is voor grove den gemiddeld  $7,3^\circ$  en voor haagbeuk gemiddeld  $3,7^\circ$  (zie ook Bijlage VI). De met de ultrasoon anemometer gemeten stijging van de wind, op hoogte 1,0 m vlak voor de bomen wordt gegeven in de laatste kolom. Dit is de stijghoek in de richting loodrecht op het gewas, gemiddeld over de gehele meettijd van het betreffende experiment. Bijna alle experimenten vertoonden een stijging van de lucht voor de bomen; experiment 14 is een opvallende uitzondering. Tijdens dat experiment was de gemiddelde windsnelheid relatief laag en de windrichting erg variabel; de stijging kon dan ook niet goed worden vastgesteld. Met weglating van experiment 14 was de gemiddelde stijging zoals gemeten met de ultrasoon anemometer  $2,5^\circ$  voor de grove den; voor de haagbeuk was dit  $3,9^\circ$ . Deze stijging was bij de experimenten met grove den duidelijk lager dan de berekende hellingshoek op basis van luchtbalans. Bij de haagbeuk gaven beide methoden ongeveer dezelfde hoek te zien. De haag met grove den was dichter dan die met haagbeuk en zou dus meer opstuwing moeten geven. Dit wordt bevestigd door de berekende hellingshoeken. De ultrasoon anemometer daarentegen mat slechts op één positie voor de haag, terwijl het precieze stromingsprofiel voor de haag en door de haag niet bekend is. De belangrijkste stuwing zou bij de dennen op een andere plaats kunnen optreden dan waar de ultrasoon anemometer was opgesteld.

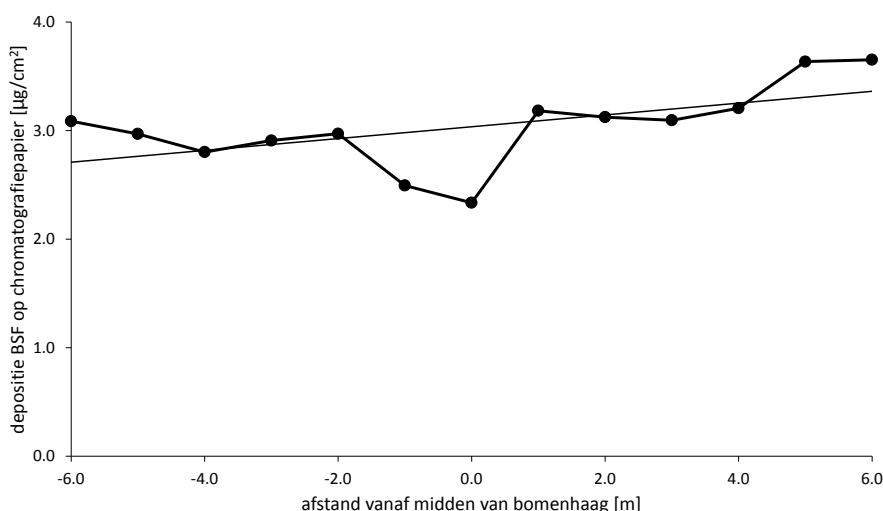
Tabel 14. *Bepaling van opstuwing op basis van luchtbalans en gemeten met de ultrasoon anemometer vlak voor de bomenhaag.*

| Proef-nummer | Gewas     | $\Delta H$<br>[m] | Hellingshoek op 6,5 m<br>[°] | Stijging (ultrasoon)<br>[°] |
|--------------|-----------|-------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 4            | Grove den | 1,17              | 9,5                          | – <sup>1</sup>              |
| 5            | Grove den | 1,13              | 9,2                          | – <sup>1</sup>              |
| 8            | Grove den | 0,92              | 7,5                          | 2,7                         |
| 9            | Grove den | 0,96              | 7,8                          | 1,7                         |
| 10           | Grove den | 0,87              | 7,1                          | 1,2                         |
| 11           | Grove den | 0,93              | 7,6                          | 4,7                         |
| 12           | Grove den | 0,82              | 6,7                          | 3,4                         |
| 16           | Grove den | 0,71              | 5,8                          | 1,2                         |
| 17           | Grove den | 0,54              | 4,4                          | -2,9                        |
| 13           | Haagbeuk  | 0,48              | 3,9                          | 3,9                         |
| 14           | Haagbeuk  | 0,41              | 3,3                          | 4,2                         |
| 15           | Haagbeuk  | 0,46              | 3,7                          | 3,7                         |

<sup>1</sup> Niet gemeten.

### 4.3.7 Controlemetingen

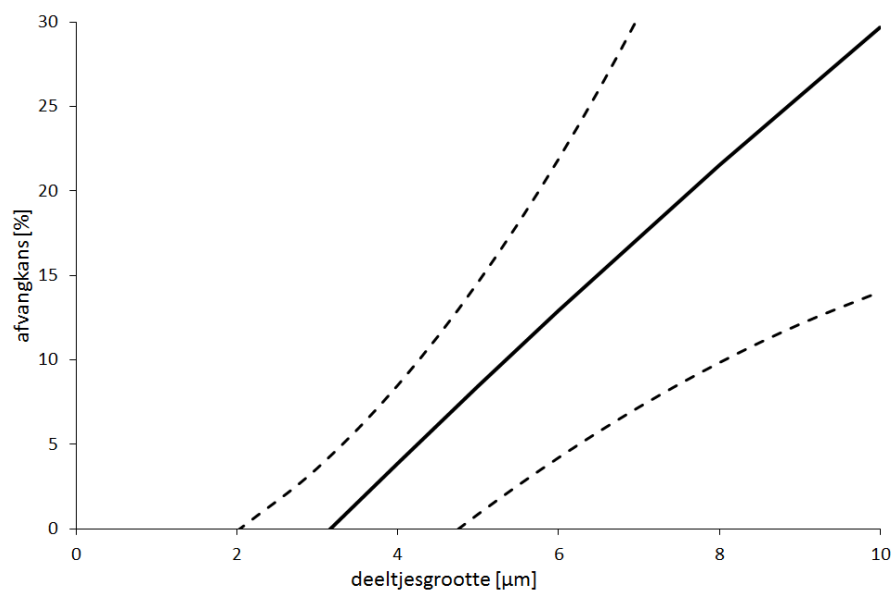
Op 1,5 m hoogte, dwars voor de bomenhaag, werd op 13 chromatografiepapiertjes de depositie van BSF gemeten. Met deze controlemetingen kon worden vastgesteld of het concentratieprofiel voldoende vlak was. In alle gevallen bleek het front redelijk constant, soms met een geringe stijging of daling van links naar rechts. Dit verloop van concentratie langs de voorkant van de bomenhaag bedroeg gemiddeld slechts 1% per meter zijwaartse verplaatsing. Voor de experimenten was dit voldoende vlak. Als voorbeeld is het profiel zoals gemeten bij experiment 4 te zien in Figuur 26. Het front is relatief vlak en heeft een helling die overeenkomt met een stijging van 1,8% per meter zijwaartse verplaatsing. De voorste mast staat bij  $x=0$ , ongeveer 0,5 m voor de lijn met chromatografiepapiertjes. Deze mast houdt de stofwolk enigszins tegen, wat goed te zien is in een verlaagde depositie nabij  $x=0$ . Omdat de depositie op het gewas terzijde van de mast is gemeten (zie Figuur 9) wordt ervan uitgegaan dat deze 'schaduwwerking' niet van invloed is geweest op de depositiemetingen.



Figuur 26 Voorbeeld van de depositie van BSF op chromatografiepapier dwars voor de bomenhaag (experiment 4). De 'dip' bij  $x=0$  wordt veroorzaakt door schaduwwerking van de voorste mast.

## 4.4 De interceptie van fijnstof door grove den en haagbeuk

In Par. 2.7 is gesproken over de relatie tussen deeltjesgrootte en afvangkans. De experimenten met grove den zijn bij drie BSF-concentraties uitgevoerd, dus met drie ranges van deeltjesgroottes. Dit biedt voldoende houvast om een relatie tussen deeltjesgrootte en afvangkans te onderzoeken. De resultaten voor afvangst van fijnstof in de afzonderlijke experimenten vertonen echter spreiding als gevolg van toevallige (statistische) fout maar ook door variatie in meteorologische omstandigheden per experiment. De relatie tussen deeltjesgrootte en afvangkans kan daarom niet exact vastgesteld worden maar vertoont een zekere spreiding. Figuur 27 toont het resultaat van de analyse van deze relatie. Er is een duidelijk verband tussen deeltjesgrootte en afvangkans. Grotere deeltjes worden beter afgevangen dan kleinere deeltjes. De kans dat deeltjes kleiner dan ca.  $3\text{ }\mu\text{m}$  worden afgevangen is erg klein. De gestreepte curves geven een globale indicatie van de bandbreedte: in feite kan de afvangkans momenteel niet nauwkeuriger vastgesteld worden dan dat ze binnen deze grenzen moet liggen. Strikt genomen zijn deze resultaten alleen van toepassing op bomen van de soort grove den met een structuur zoals gebruikt in de experimenten en onder globale weersomstandigheden eveneens zoals in de experimenten van toepassing waren. Voor de haagbeuk kon geen relatie tussen deeltjesgrootte en afvangkans worden bepaald, aangezien maar bij één deeltjesgrootte metingen zijn verricht.



*Figuur 27. Berekende relatie tussen deeltjesgrootte en afvangkans voor grove den. De getrokken lijn geeft het gemiddelde verband aan, de gestreepte lijnen de globale marge.*

## 5. Discussie en conclusies

### 5.1 De balansen

Alle balansen voor de verschillende veldexperimenten vertonen een tekort. Dit betekent dat bij alle experimenten een gedeelte van de massa deeltjes niet wordt teruggevonden. Ook bij de experimenten zonder gewas was er een gemiddeld verlies van deeltjes van ca. 10%. Dit kan vermoedelijk opgevat worden als onzekerheid in de toegepaste methode, maar een zeker systematisch karakter is nog niet uit te sluiten. De experimenten met de bomenrijen hebben een groter tekort dan deze 10%, namelijk van 15% bij de grote fijnstofdeeltjes bij grove den tot 34% bij de kleine deeltjes bij grove den. Bij grove den kan het tekort aan deeltjes voor een klein gedeelte verklaard worden doordat de afvangst op de stamdelen van de bomen niet is gemeten maar geschat. Voor de stamdelen is dezelfde afvangst aangehouden als voor de naalden. Het bleek niet mogelijk om de tracer van de stamdelen te spoelen. Bij testmetingen voorafgaand aan de experimenten werd al vastgesteld dat er teveel hars vrij kwam uit de stamdelen om nog een goede meting aan de monsters te kunnen verrichten. Het gelijkstellen van de afvangst van de naalden aan de stamdelen kan wellicht een onderschatting zijn. Bij de haagbeuk bleek namelijk dat de stamdelen naar verhouding meer deeltjes hadden afgevangen dan de bladeren, hetgeen ook uit windtunnelonderzoek bevestigd wordt (Little 1977). Als de afvangst voor de stamdelen van grove den wordt verhoogd, heeft dit echter een beperkt effect op het verkleinen van het tekort op de balans.

De massa niet teruggevonden deeltjes lijkt toe te nemen als de deeltjes kleiner worden. Vooralsnog is hier nog geen verklaring voor. Mogelijk vindt er niet alleen opstuwung plaats over de bomen heen, maar ook spreiding van de deeltjeswolk om de zijanten van de bomen. Dit zou resulteren in verlaagde concentraties achter de bomen, met een tekort op de balans als gevolg.

Voor de massabalans is gebruik gemaakt van een balans op basis van gelijke hoeveelheden verplaatste lucht voor en achter de bomenhaag. Dit is een juiste methode als menging van lucht tussen voorste en achterste mast verwaarloosd mag worden. De theorie van Bijlage I laat echter zien dat er wel degelijk sprake kan zijn van significante menging van lucht op dit traject, aangezien de stofwolk uitdijt naar boven (door diffusie), ook als er geen bomen tussen staan. Wanneer rekening gehouden zou worden met uitdijng, zou het tekort op de balans bij de experimenten zonder bomen teruggebracht kunnen worden van 10 naar ca. 5%. Bij de experimenten met bomen is er sprake van opstuwung en sterk veranderende windprofielen tussen voorste en achterste mast. Het is onduidelijk hoe in die gevallen rekening moet worden gehouden met de bijdrage van diffusie van de stofwolk. In de gepresenteerde balansen is dan ook geen rekening gehouden met diffusie. Wanneer diffusie bij de experimenten met bomen een soortgelijk effect zou hebben als bij de experimenten zonder bomen, betekent dit dat de geconstateerde tekorten met ca. 5% verlaagd zouden mogen worden. Dit blijft echter een onzeker schatting.

### 5.2 De afvangefficiëntie

De afvangefficiëntie voor de grotere fijnstofdeeltjes bij grove den is hoger dan van haagbeuk, respectievelijk 18% van de totale hoeveelheid fijnstof of  $18/45 \cdot 100\% = 39\%$  van de hoeveelheid tot de boomhoogte (Figuur 22) en 5% van de totale hoeveelheid fijnstof of  $5/46 \cdot 100\% = 11\%$  van de hoeveelheid tot de boomhoogte (Figuur 25). Vanuit de literatuur is bekend dat naaldvorige structuren fijnstof efficiënter afvangen dan brede bladeren (Beckett *et al.* 2000b) maar hier speelt de relatief grote bladoppervlakte van de vele naalden ten opzichte van bladeren ook zeker een rol. De resultaten van deze proeven zijn in overeenstemming met andere onderzoeksresultaten (Beckett *et al.* 2000a; Freer Smith *et al.* 2004). Voor grove den is het afvangpercentage zeer hoog, en enigszins geflatteerd hoog omdat bij twee van de drie de veldexperimenten het percentage droge deeltjes erg laag was (Tabel 8, laatste kolom). Grotere deeltjes zoals druppels worden gemakkelijker afgevangen en het percentage afvangst voor de grote fijnstofdeeltjes in grove den is daardoor hoog. Het derde experiment met deze grotere fijnstofdeeltjes had een afvangefficiëntie van 14% van de totale hoeveelheid fijnstof of  $14/40 \cdot 100\% \approx 34\%$  van de hoeveelheid tot de boomhoogte, terwijl de andere twee experimenten een afvangefficiëntie hadden van 19% en 20% van de totale

hoeveelheid fijnstof of  $19/49 \cdot 100\% \approx 40\%$  en  $20/47 \cdot 100\% \approx 44\%$  van de hoeveelheid tot de boomhoogte (zie ook Tabel 12).

Een vraag die nog beantwoord moet worden, heeft betrekking op de vergelijkbaarheid van de kunstmatig gemaakte fijnstofdeeltjes met de werkelijke deeltjes fijnstof afkomstig uit de (pluim)veehouderij. De afvangst van de deeltjes hangt samen met de eigenschappen van deze deeltjes. Er is echter bijzonder weinig bekend over de eigenschappen van fijnstof uit de veehouderij of uit andere bronnen. De vraag of de gevonden afvangefficiënties ook gelden voor fijnstof afkomstig uit stallen voor deeltjes van dezelfde grootte, is in dit onderzoek niet bekeken. Een directe vertaling van percentages kan alleen onder de aanname gedaan worden, dat de 'plakkans' tussen fijnstof dat in deze studie is gemaakt, vergelijkbaar is met de 'plakkans' van fijnstof afkomstig uit de (pluim)veehouderij.

De vastgestelde afvangefficiëntie neemt af naarmate de deeltjes kleiner worden, hetgeen eveneens in overeenstemming is met andere onderzoeksresultaten (Little 1977). De emissie van fijnstof uit de veehouderij bestaat voor slechts 6% van de massa uit deeltjes kleiner dan  $2,5 \mu\text{m}$  en voor ruim 90% uit de deeltjesgrootten die in dit onderzoek zijn onderzocht (Aarnink *et al.* 2011). Een bomenhaag heeft een hogere afvangefficiëntie voor relatief grote fijnstofdeeltjes. Een bomenhaag is daardoor gunstig voor het verlagen van de fijnstofconcentratie rondom veehouderijbedrijven.

### 5.3 Het effect van een bomenhaag op de concentratie fijnstofdeeltjes

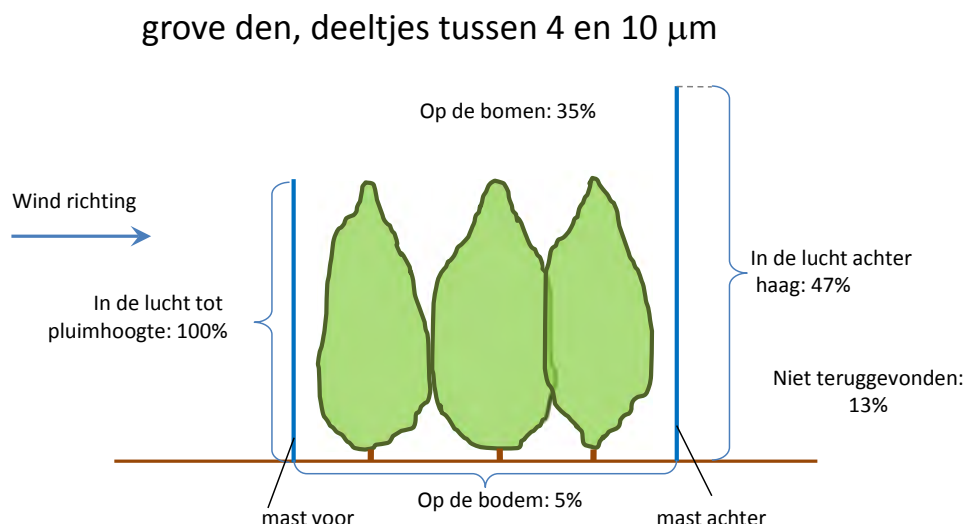
Met het kwantificeren van de afvangst van fijnstofdeeltjes door een bomenhaag kan onder enkele aannames een voorzichtige schatting gedaan worden over de afname van de concentratie fijnstof in de lucht op grotere afstand achter de haag. Achter de bomenhaag zal het oorspronkelijke windprofiel zich uiteindelijk herstellen (voor zover er geen andere obstructies zijn). Doorgaans wordt aangenomen dat het windprofiel hersteld is op een afstand van ongeveer 20 maal de hoogte van de bomenhaag. De concentratie fijnstofdeeltjes zou op die afstand achter de bomenhaag lager moeten zijn in vergelijking tot een soortgelijke situatie zonder bomenhaag: immers een deel van het fijnstof zit op de bomen en is niet meer in de lucht aanwezig. Hoewel in deze veldexperimenten niet vastgesteld, is het redelijk om een afname van de concentratie fijnstof te veronderstellen van dezelfde orde als de afvangst van deeltjes door de bomenhaag. Voor de bomenhaag met dennen zal de concentratie van het herstelde windprofiel in vergelijking met het windprofiel zonder haag, 18% lager zal zijn voor de grotere stofdeeltjes en 4% lager voor de middelgrote stofdeeltjes. Voor de haag met haagbeuk zal de concentratie van het herstelde windprofiel ongeveer 5% lager zijn dan in de situatie zonder haag. Bijkomend effect is een extra verdunning door de verhoogde turbulentie rond de bomenhaag. Het is echter vooralsnog moeilijk om deze extra verdunning te kwantificeren.

### 5.4 Extrapolatie van de resultaten naar de veehouderij

Een bomenhaag op enige afstand van de ventilatoren van een stal kan een bijdrage leveren aan het verlagen van de concentratie fijnstof op grotere afstand achter de haag (na herstel van het windprofiel). Voor een goede vergelijking zou de haag wel van dezelfde samenstelling moeten zijn als in deze studie. De beste afvangstefficiëntie wordt gerealiseerd als de haag op enige afstand staat van de ventilatoren en minstens even hoog is als de hoogte van de emissiepluim uit de ventilator (Figuur 28). Alle emissies komen in die ideale situatie goed gemengd met buitenlucht tot een hoogte van de haag aanwaaien. In die situatie lijkt een geschatte afvangefficiëntie van 35% voor grotere stofdeeltjes en 10% voor middelgrote stofdeeltjes bij een haag van grove den redelijk. Voor een haag van haagbeuk is de geschatte afvangefficiëntie in deze ideale situatie 12%.

Het zou bijzonder wenselijk zijn om deze schattingen in een praktijksituatie te onderzoeken.





*Figuur 28. De ideale situatie van een bomenhaag rondom een veehouderijbedrijf voor de maximale afvangst van fijnstof deeltjes door de haag. De emissiepluim is even hoog als de bomenrij. Vanuit de onderzoeksresultaten wordt een verbetering van de concentratie na herstel van het windprofiel voor deze ideale situatie op 35% geschat t.o.v. de situatie zonder bomenrij.*

## 5.5 Conclusies

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

- Grove den (de naaldboom) heeft een hogere afvang efficiëntie dan haagbeuk (de loofboom), zowel door een grotere afvangende oppervlakte als intrinsiek door de gunstiger vorm van naalden ten opzichte van bladeren.
- Kleinere fijnstofdeeltjes worden minder efficiënt afgevangen dan grotere fijnstofdeeltjes.
- De afvang efficiëntie van grove den voor middelgrote en grote fijnstofdeeltjes is 9% tot mogelijk meer dan 30% van de massa aan deeltjes die tot een hoogte van de bomenhaag in de lucht aanwezig is.
- De afvang efficiëntie van haagbeuk voor de grote fijnstofdeeltjes is ongeveer 12% van de massa aan deeltjes die tot een hoogte van de bomenhaag in de lucht aanwezig is.
- De massabalans zonder bomen laat een tekort zien van ca. 10%; dit is een maat voor de onzekerheid van de experimentele methode.
- Alle posten van de balans zijn gemeten. Het blijkt dat er een tekort op de balans is van ca. 25%. Dit is een aanzienlijk verlies van deeltjes die niet uit de balansposten kan worden verklaard en duidelijk groter dan de geschatte experimentele onzekerheid.
- Een schatting van de gevonden resultaten geeft aan dat het plaatsen van een bomenhaag, conform de onderzochte geometrie en in het uitstroombied van stalventilatoren, duurzaam (op grotere afstand achter de haag) de concentratie van fijnstofdeeltjes (4 tot 10  $\mu\text{m}$ ) kan verminderen tot 18% voor grove den (Figuur 22) en tot 5% voor haagbeuk (Figuur 25). Het plaatsen van een dergelijke bomenhaag zou daarbij idealiter op enige afstand van de stal moeten zijn, zodanig dat emissies uit ventilatoren gelijkmatig gemengd in de lucht bij de haag aankomen.

## 5.6 Aanbevelingen

Op basis van dit rapport worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Onderzocht zal moeten worden of het mogelijk is om de balansbenadering toe te passen op een groenelement rondom een veehouderijbedrijf met een hoge emissie van fijnstof.
- Indien dit mogelijk is, is het uitvoeren van een praktijkproef aan te bevelen. Het meenemen van de effecten van een bomenrij op de ammoniakemissie is slechts een kleine stap om mee te nemen en daardoor aan te bevelen.

- Als deze praktijkproef resultaten geeft in dezelfde orde van grootte als de proeven van deze studie, moet met deze resultaten een schatting gemaakt worden op de verbetering van de jaarlijkse gemiddelde concentratie fijnstof en ammoniak.
- Deze studie geeft indicatief aan dat de grotere stofdeeltjes, (groter dan PM10), voor ruim 40% worden afgevangen. Hoewel het niet de bedoeling was, zijn in de experimenten 4 en 5 de druppeltjes onvoldoende gedroogd en bleek de afvang efficiëntie ruim 40% te zijn. Ook voor de grotere stofdeeltjes kunnen groenelementen daarom een positieve bijdrage leveren aan het reduceren van deeltjes in de lucht. Het is aan te bevelen dit verder te onderzoeken.

# Literatuur

- 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]. Wageningen UR Livestock Research, Lelystad. 22 p p.
- Beckett, K.P., P. Freer Smith & G. Taylor, 2000a.  
Effective tree species for local air-quality management. *Journal of Arboriculture* 26, 12-19.
- Beckett, K.P., P.H. Freer Smith & G. Taylor, 2000b.  
Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed. *Global Change Biology* 6, 995-1003.
- Bouvet, T., B. Loubet, J.D. Wilson & A. Tuzet, 2007.  
Filtering of windborne particles by a natural windbreak. *Boundary-Layer Meteorology* 123, 481-509.
- 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.
- Freer Smith, P.H., A.A.E. Khatib & G. Taylor, 2004.  
Capture of particulate pollution by trees: A comparison of species typical of semi-arid areas (*Ficus nitida* and *Eucalyptus globulus*) with European and North American species. *Water Air and Soil Pollution* 155, 173-187.
- Graedel, T.E. & P.J. Crutzen, 1993.  
Atmospheric change: an earth system perspective. Freeman, New York. 446 p.
- Grinshpun, S.A., G.N. Lipatov & A.G. Sutugin, 1990.  
Sampling errors in cylindrical nozzles. *Aerosol Science and Technology* 12, 716-740.
- Hanna, S.R., G.A. Briggs & R.P.J. Hosker, 1982.  
Handbook on atmospheric diffusion. DOE/TIC-11223, Oak Ridge, TN, 107 pp.
- Holterman, H.J. & A.A. Pronk, 2011.  
Study on drop size distribution of evaporating water and saline sprays. In Fachtagung 'Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik', Ilmenau, 6 – 8 September 2011, 2011.
- Holterman, H.J., J.C. Van De Zande, H.A.J. Porskamp & J.F.M. Huijsmans, 1997.  
Modelling spray drift from boom sprayers. *Computers and Electronics in Agriculture* 19, 1-22.
- Little, P., 1977.  
Deposition of 2.75, 5.0 and 8.5  $\mu\text{m}$  particles to plant and soil surfaces. *Environmental Pollution* 12, 293-305.
- Ogink, N.W.M. & A.J.A. Aarnink, 2011.  
Plan van aanpak bedrijfsoplossingen voor fijn stofreductie in de pluimveehouderij. Animal Sciences Group, Lelystad. 19 pp.
- Raupach, M.R., N. Woods, G. Dorr, J.F. Leys & H.A. Cleugh, 2001.  
The entrapment of particles by windbreaks. *Atmospheric Environment* 35, 3373-3383.
- Ucar, T., F.R. Hall, J.E. Tew & J.K. Hacker, 2003.  
Wind tunnel studies on spray deposition on leaves of tree species used for windbreaks and exposure of honey bees. *Pest Management Science*. 2003; 59, 358-364.
- Vincent, J.H., D.C. Stevens, D. Mark, M. Marshall & T.A. Smith, 1986.  
On the aspiration characteristics of large-diameter, thin-walled aerosol sampling probes at yaw orientations with respect to the wind. *Journal of Aerosol Science* 17, 211-217, 219-224.



## Bijlage I.

# Verspreiding van een puntbron volgens een Gaussisch pluimmodel

Deeltjes uit een puntbron komen in de lucht terecht en verspreiding zich doordat de luchtstromingen de deeltjes meevoeren in alle mogelijke richtingen. De hoofdrichting van de deeltjes is met de hoofdstroming van de wind maar de deeltjes waaien ook uit in de vorm van een pluim. Een gerechtvaardigde veronderstelling is dat deze verstoringen normaal verdeeld zijn en de meest simpele statistische benadering voor de verspreiding van een puntbron van verontreinigingen in de lucht is daardoor een normaal verdeeld (Gaussisch) pluimmodel. Hiervoor zijn de volgende aannamen noodzakelijk:

- Een homogene atmosfeer (geen verloop van grootheden met de hoogte)
- Een stationaire atmosfeer (geen verandering in de tijd)
- Een verdeling van de concentraties rond de as van de pluim volgens een Gauss-verdeling gekarakteriseerd door de standaard deviatie in de Y-richting ( $\sigma_y$ , horizontaal) en Z-richting ( $\sigma_z$ , verticaal).
- Een voldoende lange meettijd (>45 min) om toevallige fluctuaties statistisch op te kunnen vangen.

De verdeling heeft dan de volgende vorm (Hanna *et al.* 1982):

$$C_{x,y,z;H_e} = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left[\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right] * \left( \exp\left[\frac{-(z-H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right] + R_b \exp\left[\frac{-(z+H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right) \quad (I.1)$$

Met hierin:

$C_{x,y,z;H_e}$ : Gemiddelde concentratie in het punt (x,y,z) ten gevolge van een emissie Q uit een punt bron op hoogte  $H_e$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

x : Afstand langs de x-as vanaf de puntbron, in de richting van de gemiddelde wind (m).

y : Afstand langs de y-as, loodrecht op de gemiddelde windrichting, in het horizontale vlak (m).

z : De hoogte boven het grondoppervlak (m).

U : De gemiddelde windsnelheid op hoogte  $H_e$  (m/s).

$\sigma_y$  : Horizontale verspreidingsparameter (m).

$\sigma_z$  : Verticale verspreidingsparameter (m).

Q : Emissiesterkte van de stofbron ( $\mu\text{g}/\text{s}$ ).

$H_e$  : Effectieve bronhoogte (m).

De laatste exponent in bovenstaande vergelijking representeert de reflectie van de wolk tegen de grond; de wolk kan immers niet de grond in diffunderen. De factor  $R_b$  (tussen 0 en 1) is de fractie die daadwerkelijk reflecteert; een waarde kleiner dan 1 houdt dan rekening met depositie van deeltjes op de grond.

Voor de berekeningen zijn de volgende waarden voor de grootheden aangenomen:

x = 30 m (afstand tussen aerosolgeneratoren en vegetatie).

U = 2,2 m/s; op hoogte  $H_e$ .

Q = 5400  $\mu\text{g}/\text{s}$  (bij beginconcentratie tracer in de spuitvloeistof van 1,3 g/L, waarvan 15 L verspoten wordt in 1 uur tijd).

$H_e$  = 1.5 m, de hoogte van de vernevelaars boven de grond.

$R_b$  = 0.8; arbitrair: 80% van het deel van de wolk dat op de grond belandt, reflecteert als het ware terug de lucht in.

Voor een schatting van de verspreidingsparameters  $\sigma_y$  en  $\sigma_z$  wordt de methode van Pasquill, Irwin en anderen gebruikt (Hanna *et al.* 1982):

$$\sigma_y = \sigma_\theta \cdot x \cdot S_y \quad (I.2)$$

Hierin is  $\sigma_\theta$  de standaarddeviatie in de windrichting in het horizontale vlak;  $S_y$  is een empirische correctiefunctie:

$$S_y = \left(1 + 0.031 \cdot x^{0.46}\right)^{-1} \quad \text{voor } x < 10^4 \text{ m} \quad (I.3)$$

Een gemiddelde waarde voor  $\sigma_\theta$  onder neutrale en licht onstabiele condities is  $15^\circ$ , ofwel ca. 0,26 rad. Bij  $x = 30$  m volgt een  $\sigma_y$ -waarde van 6,8 m.

Een schatting voor de verticale spreiding  $\sigma_z$  wordt op soortgelijke wijze verkregen:

$$\sigma_z = \sigma_e \cdot x \cdot S_z \quad (I.4)$$

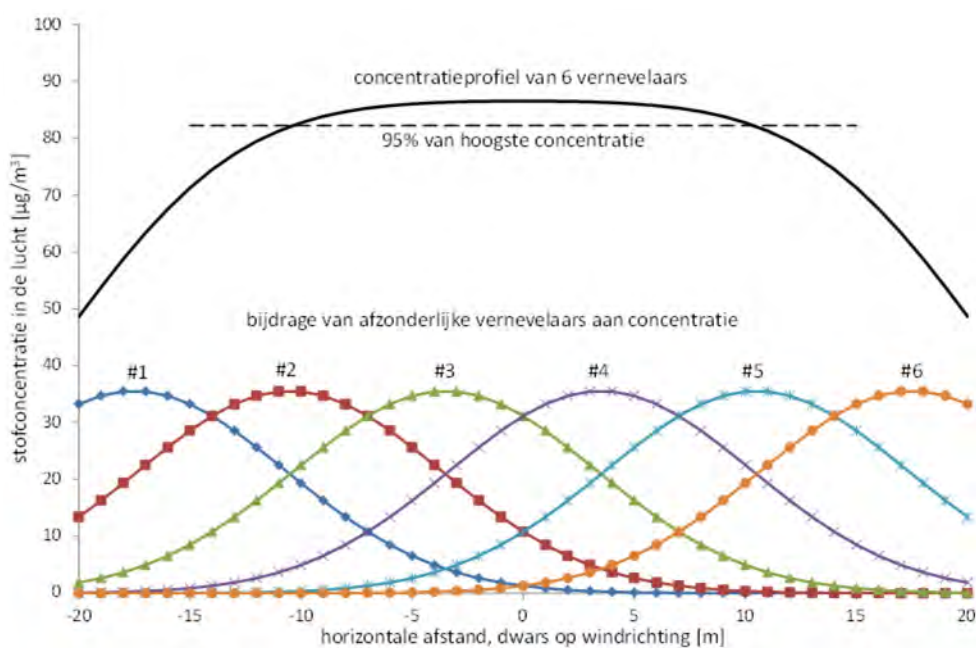
Hierin is  $\sigma_e$  de standaarddeviatie in de windrichting in het verticale vlak;  $S_z$  is een empirische correctiefunctie. Voor onstabiele situaties, zoals al gauw het geval zal zijn bij zonnig weer, is een goede schatting:  $S_z = S_y$ . Een gemiddelde waarde voor  $\sigma_e$  voor neutrale en licht onstabiele condities is  $5^\circ$ , ofwel ca. 0,09 rad (Hanna *et al.* 1982). De geschatte waarde van de verticale spreiding op 30 m afstand wordt dan  $\sigma_z = 2,3$  m.

Alle benodigde parameters zijn nu geschat, zodat de concentratie op een willekeurige locatie in de ruimte berekend kan worden met behulp van vgl.(I.1). Tabel I.1 geeft voor diverse waarden van  $y$  en  $z$  de berekende concentratie in de lucht op 30 m afstand van een rij van 6 vernevelaars met een onderlinge afstand van 7 m (dus ongeveer gelijk aan de schatting van  $\sigma_y$ ).

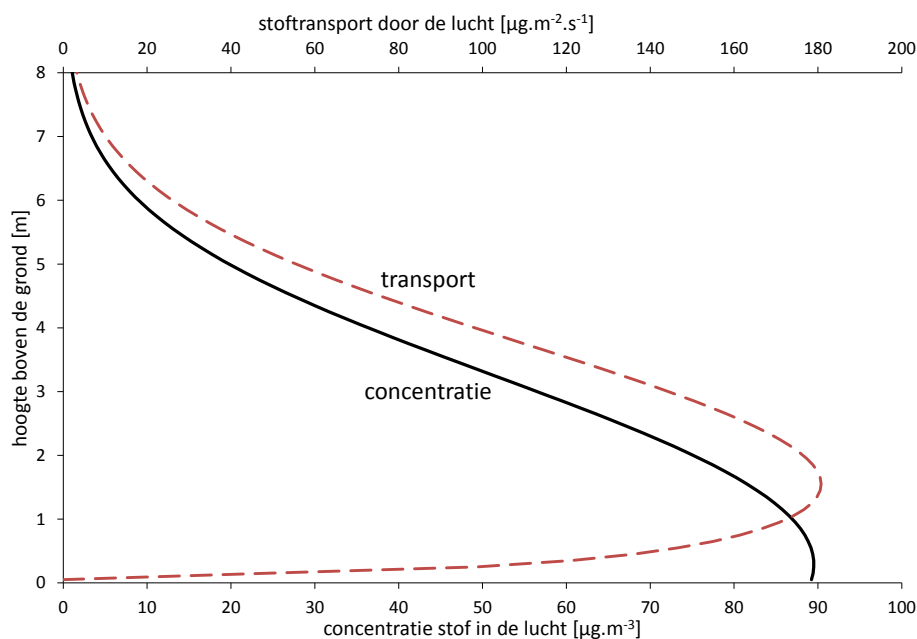
*Tabel I.1. Berekende concentraties op diverse hoogten (0.25 t/m 6 m), voor 6 aerosol generatoren geplaatst op 30 m voor de vegetatie op 1,5 meter hoogte boven de grond; afstand tussen de vernevelaars is 7,0 m.*

| Y (m) | Stofconcentratie in de lucht ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------|-----------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|       | Hoogte (m)                                                |     |     |     |     |     |     |     |     |
|       | 0,25                                                      | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 |
| -30   | 7                                                         | 7   | 7   | 7   | 6   | 5   | 3   | 2   | 1   |
| -25   | 24                                                        | 24  | 23  | 22  | 20  | 15  | 10  | 5   | 2   |
| -20   | 50                                                        | 50  | 49  | 46  | 42  | 32  | 21  | 11  | 5   |
| -15   | 73                                                        | 73  | 71  | 67  | 62  | 46  | 30  | 17  | 8   |
| -10   | 85                                                        | 85  | 83  | 78  | 72  | 54  | 35  | 19  | 9   |
| -5    | 89                                                        | 88  | 86  | 81  | 74  | 56  | 36  | 20  | 9   |
| 0     | 89                                                        | 89  | 87  | 82  | 75  | 56  | 37  | 20  | 9   |
| 5     | 89                                                        | 88  | 86  | 81  | 74  | 56  | 36  | 20  | 9   |
| 10    | 85                                                        | 85  | 83  | 78  | 72  | 54  | 35  | 19  | 9   |
| 15    | 73                                                        | 73  | 71  | 67  | 62  | 46  | 30  | 17  | 8   |
| 20    | 50                                                        | 50  | 49  | 46  | 42  | 32  | 21  | 11  | 5   |
| 25    | 24                                                        | 24  | 23  | 22  | 20  | 15  | 10  | 5   | 2   |
| 30    | 7                                                         | 7   | 7   | 7   | 6   | 5   | 3   | 2   | 1   |

Het overeenkomstige horizontale concentratieprofiel op 1 m hoogte op 30 m vanaf de vernevelaars is te zien in Figuur I.1. Door de overlap van concentratieprofielen van de afzonderlijke vernevelaars ontstaat een relatief vlak profiel; over een breedte van ca. 20 m daalt de concentratie niet onder de 95% van die in het midden. Het bijbehorende verticale concentratieprofiel in het midden ( $y=0$ ) wordt gegeven in Figuur I.2 (dichte curve). Vanaf een hoogte van 1,7 m daalt de concentratie onder de 90% van de hoogste waarde. In feite is de stofconcentratie zelf van ondergeschikt belang: het gaat vooral om het horizontaal transport van stof door de lucht. Dit transport (de flux) wordt berekend als het product van concentratie en gemiddelde windsnelheid (per hoogte). In Figuur I.2 is de flux aangegeven door de gestreepte curve. Hierbij is aangenomen dat de gemiddelde windsnelheid volgens een logaritmisch profiel toeneemt met de hoogte (boven gras van 15 cm hoogte), zodanig dat op bronhoogte  $H_e$  de windsnelheid gelijk aan  $U$  is.

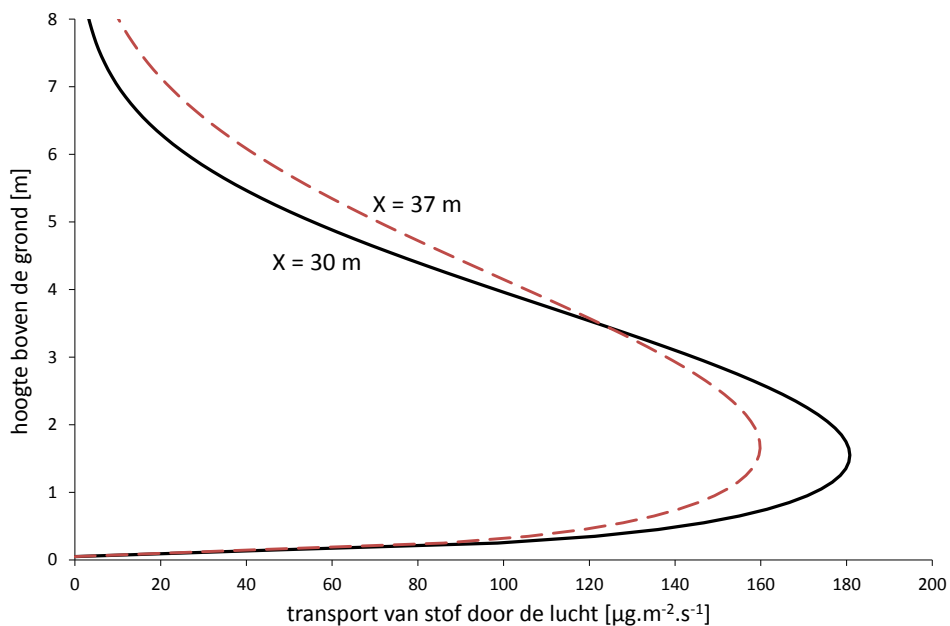


Figuur I.1. Horizontaal concentratieprofiel van stofdeeltjes in de lucht op 1 m hoogte; bepaald op 30 m afstand vanaf 6 vernevelaars met een onderlinge afstand van 7 m.



*Figuur 1.2. Verticaal concentratieprofiel van stofdeeltjes in de lucht; bepaald op 30 m afstand midden voor 6 vernevelaars met een onderlinge afstand van 7 m. De gestreepte curve geeft het bijbehorende stoftransport (flux) als functie van de hoogte (zie tekst).*

Omdat de stofwolk uitdijt naarmate de afgelegde afstand toeneemt, verandert ook het profiel van het stoftransport. In Figuur I. 3 is te zien hoe het transportprofiel verandert tussen de voorste mast (op 30 m vanaf de vernevelaars) en de achterste mast (op 37 m). De piekwaarde blijft op dezelfde hoogte liggen (ca. 1,5 m), maar neemt duidelijk af in hoeveelheid stof. Op grotere hoogte neemt de hoeveelheid getransporteerd stof juist toe, doordat de concentratie daar is toegenomen ten gevolge van de uitdijng. Onder deze omstandigheden passeert bij de voorste mast 98% van al het aanwezige stof door de onderste 6,5 m van de lucht; bij de achterste mast is dat niveau verhoogd tot 7,5 m.



*Figuur 1.3. Horizontaal stoftransport als functie van de hoogte, op 30 m en 37 m vanaf de vernevelaars.*



De breedte van het vlakke concentratieprofiel staat toe dat de gemiddelde windrichting niet exact haaks op de bomenhaag mag zijn. Wanneer bij niet-haakse wind de vernevelaars zijwaarts verplaatst worden over geschikte afstand, kan het vlakke profiel voor de bomenhaag in stand gehouden worden. Tabel I.2 geeft de benodigde zijwaartse verplaatsing aan (in stappen ter grootte van de halve afstand tussen de vernevelaars) en de globale windrichting ten opzichte van haaks op de bomenhaag waarvoor deze verplaatsing van toepassing is.

*Tabel I.2. Benodigde zijwaartse verplaatsing van de rij vernevelaars bij gemiddelde windrichtingen afwijkend van haaks op de bomenhaag, teneinde het vlakke profiel voor de bomenhaag te kunnen blijven benutten.*

| Windrichting t.o.v. haaks [graden] |     | Zijwaartse verplaatsing van vernevelaars |
|------------------------------------|-----|------------------------------------------|
| Van                                | Tot | [m]                                      |
| -22                                | -16 | -10,5                                    |
| -16                                | -10 | -7                                       |
| -10                                | -3  | -3,5                                     |
| -3                                 | 3   | 0                                        |
| 3                                  | 10  | 3,5                                      |
| 10                                 | 16  | 7                                        |
| 16                                 | 22  | 10,5                                     |



## Bijlage II.

### Bemonstering van deeltjes in de lucht

Het vangstrendement van de filterkoppen voor deeltjes kan worden afgeschat door gebruik te maken van de resultaten van experimenten die Vincent *et al.* (1986) hebben uitgevoerd met filterkoppen van 5 cm diameter en hoeken tussen aanstroomrichting en richting van aanzuiging van het monster tussen 0 en 180°. Zij kwamen tot de volgende basisvergelijking voor het vangstrendement als functie van de hoek tussen stroomrichting en aanzuigrichting:

$$A_{\alpha} = 1 + \left( 1 - \frac{1}{1 + g \cdot Stk (\cos \alpha + 4k^{-1/2} \sin^{1/2} \alpha)} \right) (k \cos \alpha - 1) \quad (II.1)$$

Hierin is:

- $A_{\alpha}$  = Monsternemings efficiëntie (Aspiration efficiency) tgv een hoek  $\alpha$  tussen aanzuiging en stroomrichting (-)
- $g$  = Empirische constante (2,1 vlg. (Vincent *et al.* 1986))
- $Stk$  = Deeltjes Stokes getal. (dimensieloos)
- $k$  = Verhouding tussen interne stroom snelheid  $u_i$  en stroomsnelheid in de aanzuig-opening  $u_0$ . (-)
- $\alpha$  = Hoek tussen aanzuigrichting en vrije stroomrichting van de lucht. (°)

Het Stokesgetal is gelijk aan de remweg van het betreffende deeltje ( $s$ ) gedeeld door een karakteristieke diameter. In dit geval nemen we daar de diameter van de monsternemer voor.

$$s = u_0 \cdot \tau \quad (II.2)$$

$$Stk = s / D \quad (II.3)$$

$$\tau = \frac{\rho_p \cdot d_p^2}{18\mu} \quad (II.4)$$

Hierin is:

- $s$  = Remweg deeltje (m)
- $u_0$  = Vrije stroomsnelheid van de lucht (m/s)
- $\tau$  = Relaxatietijd van deeltje (s)
- $\rho_p$  = Dichtheid van het deeltje (1000 kg/m<sup>3</sup>)
- $d_p$  = Deeltjesdiameter (m)
- $\mu$  = Dynamische viscositeit van lucht (1,46 · 10<sup>-5</sup> kg/m/s)

De empirische factor  $g$  hangt af van het aantal deeltjes dat de monsterneming niet binnentreedt maar op de buitenkant terecht komt en dan alsnog naar binnen kan stuiteren (Grinshpun *et al.* 1990). Die fractie is afhankelijk van de eigenschappen van het deeltje (in de extreemste gevallen nat of droog).

Voor de parameter  $g$  kan de bovengenoemde empirische waarde van Vincent *et al.* (1986) gebruikt worden voor droog vast aerosol of de relatie die Grinshpun *et al.* (1990) aangeven, welke beter rekening houdt met de verhouding tussen interne en externe stroomsnelheid ( $k$ ) van de deeltjes, maar geen onderscheid maakt tussen nat en droog:

$$g = 2 + (0.62 / k) \quad (\text{II.5})$$

Op basis van deze theorie is het monsterneming rendement voor de aanzuigconfiguratie uitgerekend, die in het veld is gebruikt. Dit is een effectieve filterdiameter van 0,039 m; een lineaire aanzuigsnelheid van 0,89 m/s.

De resultaten van de berekeningen zijn voor  $g = 2,1$  samengevat in Tabel II.1. Dit is de situatie die het meest lijkt op de experimenten van Vincent et al (1986) voor een droog aerosol.

*Tabel II.1. Berekende rendement van filters voor verschillende deeltjesgroottes en windsnelheden die representatief zijn voor de uitgevoerde fijnstofexperimenten.*

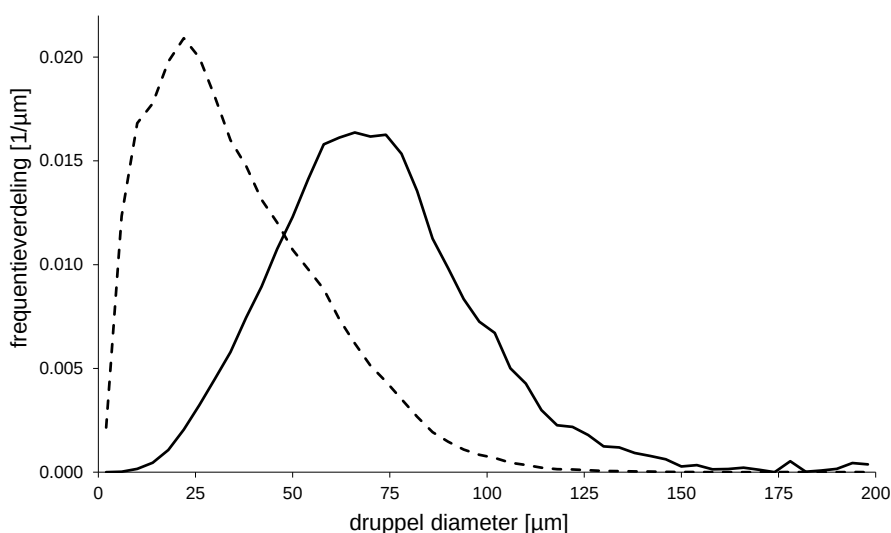
| Windsnelheid<br>m/s | Deeltjesgrootte in $\mu\text{m}$ ( $g = 2.1$ ) |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------|------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                     | 2                                              | 4    | 6    | 8    | 10   | 12   | 15   | 20   |
| 0,5                 | 1,00                                           | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 1,0                 | 1,00                                           | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,99 | 0,99 |
| 1,5                 | 1,00                                           | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,98 |
| 2                   | 1,00                                           | 1,00 | 1,00 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 0,96 |
| 3                   | 1,00                                           | 1,00 | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,96 | 0,94 |
| 4                   | 1,00                                           | 1,00 | 0,99 | 0,98 | 0,97 | 0,96 | 0,95 | 0,91 |

Uit Tabel II.1 blijkt dat de vangstefficiëntie van de filterhouders nauwelijks een rol speelt voor deeltjesdiameters onder 10  $\mu\text{m}$ . Daarboven neemt het monsterrendement af. De deeltjes moeten dus droog zijn voor bemonstering.

## Bijlage III.

### Beginconcentratie en deeltjesgrootteverdeling

De initiële druppelgrootteverdeling is in het laboratorium gemeten met behulp van een 'Phase-Doppler Particle Analyzer' (PDPA). De vernevelaar werd op 1 m afstand van de PDPA gezet. Om verdamping van druppels tussen de vernevelaar en het meetinstrument zo veel mogelijk tegen te gaan, werd gewerkt bij relatief lage temperatuur (15°C) en hoge luchtvochtigheid (80%). Op deze wijze was het effect van verdamping op druppelgrootteverdeling uit te sluiten. Van alle 6 vernevelaars werd de initiële druppelgrootteverdeling gemeten, waarna de verdelingen gemiddeld werden. Figuur III.1 toont de frequentieverdeling van de gemeten druppelgroottes. De gestreepte curve laat zien dat er veel kleine druppels zijn, met een piek bij druppels van 25 µm. Hun bijdrage aan de totale massa aan geproduceerde druppels is echter gering, zoals de getrokken curve laat zien. Wat betreft de totale massa dragen vooral druppels tussen ca. 50 en 100 µm het meest bij.

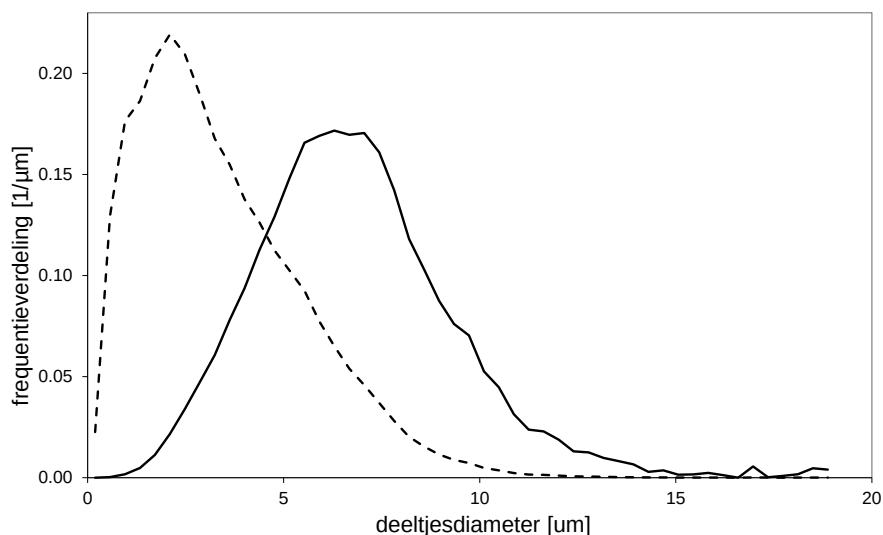


*Figuur III.1. Gemiddelde initiële druppelgrootteverdeling voor een Electrafan240 vernevelaar. Gestreepte curve: verdeling naar aantallen deeltjes; getrokken curve: verdeling naar massabijdrage.*

Elke druppel bevat dezelfde concentratie tracer, die na volledige droging als fijnstofdeeltje overblijft. Een druppel met een initiële diameter  $D_0$  heeft na droging een einddiameter  $D_1$  die gegeven wordt door:

$$D_1 = D_0 \left( \frac{C}{\rho} \right)^{1/3} \quad (\text{III.1})$$

Hierin is  $C$  [g/L] de beginconcentratie van de tracer in de vernevelde vloeistof en  $\rho$  [g/L] is de dichtheid van de tracer. De factor  $k=(C/\rho)^{1/3}$  is constant voor alle deeltjes. De grootteverdeling van het uiteindelijke fijnstof heeft dan ook dezelfde vorm als die van de druppels, maar met een ander schaal op de x-as. Figuur III.2 laat de stofgrootteverdeling zien bij een beginconcentratie van 1,3 g/L. de meeste stofdeeltjes zijn kleiner dan ruwweg 5 µm (gestreepte curve), maar hun bijdrage aan de totale massa is beperkt (getrokken curve). Bij de gegeven beginconcentratie van 1,3 g/L bestaat 90% van de droge massa uit deeltjes met een diameter kleiner dan 10 µm.



*Figuur III.2. Deeltjesgrootteverdeling voor een Electrafan240 vernevelaar, na verdamping van water, bij een beginconcentratie van 1,3 g/L (veronderstelde dichtheid 1500 g/L). Gestreepte curve: verdeling naar aantallen deeltjes; getrokken curve: verdeling naar massabijdrage.*

Door de beginconcentratie te variëren zijn stofdeeltjes met een andere grootteverdeling te maken. Onderstaande Tabel III.1 geeft bij een aantal beginconcentraties de gemiddelde deeltjesgrootte, alsmede de globale grenzen van de verdeling. Van de totale massa geproduceerde stofdeeltjes heeft 80% afmetingen binnen de grenzen  $D_{v10}$  en  $D_{v90}$ ; 10% is kleiner dan wel groter dan deze beide grenswaarden. De gemiddelde diameter is de zogenaamde 'massa-mediane diameter' (MMD); dat is de diameter ongeveer bij de top van de getrokken curve in Figuur III.2.

*Tabel III.1. Concentratie tracer (BSF) en de gemiddelde deeltjesgrootte en diametergrenzen waarbinnen 80% van het stof zich bevindt.*

| Concentratie BSF<br>[g/L] | Gemiddelde grootte<br>[μm] | $D_{v10}$<br>[μm] | $D_{v90}$<br>[μm] |
|---------------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|
| 1,3                       | 6,6                        | 3,8               | 10,0              |
| 1,0                       | 6,1                        | 3,5               | 9,2               |
| 0,4                       | 4,5                        | 2,6               | 6,8               |
| 0,2                       | 3,5                        | 2,0               | 5,4               |
| 0,1                       | 2,8                        | 1,6               | 4,3               |

## Bijlage IV.

### Berekening van de massabalans

De bepalingen voor de massabalans zijn op te splitsen in totale massa fijn stof in de lucht voor en achter de bomenhaag, op de grond onder de bomen en op de bomen zelf. Fijnstof in de lucht wordt gemeten in de masten voorzien van filters waar doorheen lucht wordt afgezogen. Het fijnstof blijft daarbij achter op de filters. Zijn  $M_v$  en  $M_a$  de totale hoeveelheid fijnstof in de lucht respectievelijk voor en achter de bomenhaag, en  $M_g$  de hoeveelheid op de grond neergeslagen en  $M_b$  de hoeveelheid afgevangen door de bomen, dan geldt de volgende balans:

$$M_v = M_a + M_g + M_b \quad (\text{IV.1})$$

De afzonderlijke termen in deze balans worden hieronder uitgewerkt. Om praktische redenen zijn deze massa's fijnstof uitgedrukt per meter haagbreedte [g/m]. Dit is alleen toegestaan als de totale haagbreedte voldoende lang is om randeffecten te mogen uitsluiten, althans voor de bomen en locaties waar bemonsterd wordt.

#### Filtermast

Het afzuigstelsel voor de filtermasten is zodanig opgezet dat de afzuigsnelheid door alle filters praktisch gelijk is. Stel de afzuigsnelheid door een filter is  $v_f$  [m/s] en de oppervlakte van het filter is  $S_f$  [m<sup>2</sup>]. Het per filter bemonsterde debiet is dan  $Q_f = v_f S_f$  [m<sup>3</sup>/s]. Stel filter met index  $j$  is geplaatst op een hoogte  $h_j$  waar de concentratie fijnstof in de lucht gelijk is aan  $C_j$  [µg/m<sup>3</sup>]. Wanneer er bemonsterd wordt gedurende een totale meettijd  $t_m$  [s], dan is de afgevangen massa fijnstof op het filter gelijk aan (in [µg]):

$$m_j = C_j Q_f t_m = C_j v_f S_f t_m \quad (\text{IV.2})$$

Filters worden in het laboratorium geanalyseerd, waarbij de belading met fijnstof bepaald wordt. De belading wordt uitgedrukt in massa per oppervlakte-eenheid ([µg/m<sup>2</sup>]) en is gelijk aan:

$$p_j = \frac{m_j}{S_f} = C_j v_f t_m \quad (\text{IV.3})$$

Door herschrijven van deze uitdrukking is de concentratie fijnstof in de lucht te bepalen, ter hoogte van het bemonsterde filter:

$$C_j = \frac{p_j}{v_f t_m} \quad (\text{IV.4})$$

Bij een gemiddelde windsnelheid  $w_j$  [m/s] ter hoogte van filter  $j$ , is de flux te berekenen uit:

$$\Phi_j = C_j w_j \quad (\text{IV.5})$$

met eenheid [µg/m<sup>2</sup>/s]. Dit is de massa fijnstof in de lucht die per seconde door een denkbeeldig oppervlak van 1 m<sup>2</sup> waait. Combinatie van vgl.(IV.4) en (IV.5) levert de flux ([µg/m<sup>2</sup>/s]) op filterhoogte op, uitgedrukt in gemeten belading en totale meettijd en gecorrigeerd voor verschil in windsnelheid en afzuigsnelheid:

$$\Phi_j = \frac{w_j p_j}{v_f t_m} \quad (\text{IV.6})$$

### Hoeveelheid fijnstof in de lucht

Het totale aanbod aan fijnstofdeeltjes in de lucht voor de bomenhaag is de integraal van de flux over de totale meethoogte  $H_v$ , vermenigvuldigd met de meettijd:

$$M_v = t_m \int_{z=0}^{H_v} \Phi_v(z) dz = t_m \sum_j \Phi_{vj} \Delta z_{vj} \quad (IV.7)$$

In de laatste uitdrukking is de integraal vervangen door een sommatie over alle meethoogtes, met bijbehorende stapgrootte  $\Delta z_j$ . De index  $v$  bij de flux en de stapgrootte geeft aan dat het om de flux voor de bomenhaag gaat. De stapgroottes worden zodanig gekozen, dat de overgang van de ene stap naar de volgende precies midden tussen twee filters valt. Op deze wijze bevinden de filters zich ongeveer in het midden van een stap. Door de sommatie te gebruiken in plaats van de integraal wordt impliciet verondersteld dat binnen een stap  $\Delta z_{vj}$  de flux constant is (en gelijk aan die op filterhoogte). De eenheid van  $M_v$  is  $[\mu\text{g}/\text{m}]$ , oftewel massa per strekkende meter (dat wil zeggen, per meter haagbreedte). De stapgrootte bij het bovenste filter is zodanig gekozen, dat  $H_v=6.5$  m voor de mast voor de bomenhaag.

Op soortgelijke wijze kan de hoeveelheid fijnstof  $M_a$  achter de bomenhaag bepaald worden, door te sommeren over de fluxen  $\Phi_{aj}$ , met bijbehorende stapgroottes  $\Delta z_{aj}$ . Wanneer  $H_v$  onvoldoende hoog is, dat wil zeggen, wanneer de kans bestaat dat er fijnstof hoger dan  $H_v$  in de lucht is, moet de integratiehoogte  $H_a$  achter de bomenhaag dusdanig gekozen worden, dat er aan de voorkant tot een hoogte  $H_v$  evenveel lucht stroomt als aan de achterkant tot een hoogte  $H_a$ :

$$q_{lucht} = \int_{z=0}^{H_v} w_v(z) dz = \int_{z=0}^{H_a} w_a(z) dz \quad (IV.8)$$

Hierin is  $q_{lucht}$  het volume lucht  $[\text{m}^3/\text{m}/\text{s}]$  dat per seconde per meter haagbreedte tussen de bodem en hoogte  $H_v$  of  $H_a$  langs stroomt. De hoogte  $H_a$  hangt af van  $H_v$  en de windsnelheidsprofielen  $w_v$  en  $w_a$  voor en achter de bomenhaag. Omdat deze profielen verschillend zijn als er een bomenhaag tussen staat, zal hoogte  $H_a$  aangepast moeten worden om de luchtbalans sluitend te krijgen. Als sommatie over stapgroottes  $\Delta z$  wordt dit geschreven als:

$$q_{lucht} = \sum_j w_{vj} \Delta z_{vj} = \sum_j w_{aj} \Delta z_{aj} \quad (IV.9)$$

Voor de hoogtes  $H_v$  en  $H_a$  geldt in dat geval:

$$H_v = \sum_j \Delta z_{vj} \quad H_a = \sum_j \Delta z_{aj} \quad (IV.10)$$

De bovenste stapgrootte aan de achterzijde wordt nu zodanig ingesteld, dat de luchtbalans vgl.(IV.9) sluitend is.

Voor het bepalen van de afvangefficiëntie van de bomenhaag is het aanbod fijnstof in de lucht tot boomhoogte van belang ( $M_{v,B}$ ). Dit is in feite gelijk aan vgl.(IV.7), maar alleen gesommeerd over de onderste stappen totdat de boomhoogte bereikt is (stap  $j_B$ ):

$$M_{v,B} = t_m \sum_j^{j_B} \Phi_{vj} \Delta z_{vj} \quad (IV.11)$$



### Hoeveelheid fijnstof op de grond

Tussen de mast voor en achter de bomenhaag liggen collectoren op de grond, waarop fijnstof kan neerstrijken. Een bodemcollector heeft lengte  $L_g$  en oppervlakte  $S_g$ . De belading  $p_{gj}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ) met fijnstof wordt door analyse in het laboratorium bepaald. De totale opgevangen hoeveelheid fijnstof op de bodem is dan:

$$M_g = L_g \sum_j p_{gj} \quad (\text{IV.12})$$

Dit is de massa op de bodem, per meter haagbreedte ( $\mu\text{g}/\text{m}$ ).

### Hoeveelheid fijnstof op de bomen

Een dennenboom worden bemonsterd in 12 vakken ( $n=12$ ): verdeeld over 3 hoogtes en 4 kwadranten. De haag-beuken worden bemonsterd in 6 vakken: 3 hoogtes en 2 helften. In elk vak wordt van één tak een aantal naalden of bladeren geplukt. Van dit monster wordt in het laboratorium de opgevangen massa fijnstof  $\mu\text{g}$  en de (enkelzijdige) oppervlakte  $\text{m}^2$  bepaald. De verhouding is de belading  $p_{bk}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ) voor naalden of bladeren in vak  $k$ . aangenomen wordt dat deze belading geldt voor alle naalden en bladeren in datzelfde vak.

De bomen staan opgesteld in rijen, de afstand tussen de rijen is  $d$  (gerekend van stam tot stam). De afstand tussen bomen in een rij is  $b$  (stam tot stam). Bij een gemiddelde boomhoogte  $h$  is het effectieve volume  $\text{m}^3$  dat een boom ter beschikking heeft gelijk aan:

$$V_b = h b d \quad (\text{IV.13})$$

Voor elk vak is achteraf de totale oppervlakte  $S_{bk}$   $\text{m}^2$  naalden of bladeren bepaald. In vak  $k$  kan dan in totaal aan fijnstof worden ingevangen  $\mu\text{g}$ :

$$m_{bk} = p_{bk} S_{bk} \quad (\text{IV.14})$$

Gesommeerd over alle  $n$  vakken per boom en over alle  $r$  rijen in de haag levert dit de totaal per meter haagbreedte afgevangen massa fijnstof  $\mu\text{g}/\text{m}$  is vervolgens:

$$M_b = \frac{1}{b} \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^n p_{bkj} S_{bk} \quad (\text{IV.15})$$

De afvangfractie van de bomen wordt gedefinieerd als de verhouding van de afgevangen massa  $M_b$  (vgl.(IV.15)) en de aangeboden massa in de lucht tot boomhoogte  $M_{v,B}$  (vgl.(IV.11)):

$$\eta = \frac{M_b}{M_{v,B}} \quad (\text{IV.16})$$

Deze afvangfractie is afhankelijk van de grootteverdeling van de stofdeeltjes, de windsnelheid, de structuur van de bomen en de afmetingen en dichtheid van de bomenhaag als geheel.



## Bijlage V.

### Bepaling van afvangefficiëntie uit depositiemetingen

De kans dat een stofdeeltje, wanneer het een bomenhaag passeert, in een boom blijft hangen (afgevangen wordt), is van vele factoren afhankelijk. Eén van die factoren is de deeltjesgrootte zelf. Het bepalen van de afvangkans in een zekere situatie als functie van de deeltjesgrootte is niet eenvoudig, zeker niet als de stofwolk deeltjes van uiteenlopende grootte bevat. Met behulp van onderstaande wiskundige methodiek blijkt het mogelijk om deze afvangkans te bepalen uit experimenten waarin de afvangfracties gemeten worden voor stofwolken met verschillende grootteverdelingen. Daarbij is verder alleen van belang dat die grootteverdelingen bekend zijn. In de experimenten in dit project worden de deeltjesgrootteverdelingen bepaald door de beginconcentratie van opgeloste tracer. Voor verschillende beginconcentraties kunnen zodoende verschillende grootteverdelingen van opgedroogde stofdeeltjes verkregen worden.

Veronderstel dat de stofdeeltjes direct voor de vegetatie een grootteverdeling  $f(D)$  van diameter  $D$  [m] bezitten. De te bepalen afvangefficiëntie  $g(D)$  is een functie van de deeltjesdiameter. De totale massa fijnstof [kg] direct voor de vegetatie is nu:

$$M_{tot} = \frac{\pi}{6} \rho N \int_0^{\infty} f(D) D^3 dD \quad (V.1)$$

Hierin is  $N$  het totaal aantal deeltjes en  $\rho$  hun dichtheid [kg/m<sup>3</sup>]. De afvangkans voor deeltjes van grootte  $D$  is  $g(D)$ , dus gemiddeld wordt van alle deeltjes met grootte  $D$  een fractie  $g(D)$  afgevangen door de vegetatie. De totale massa afgevangen fijnstof is dan:

$$M_{dep} = \frac{\pi}{6} \rho N \int_0^{\infty} g(D) f(D) D^3 dD \quad (V.2)$$

Bij experimenten is  $N$  gewoonlijk onbekend, maar kunnen  $M_{tot}$  en  $M_{dep}$  vastgesteld worden. De gemiddelde afvangkans is nu:

$$g_{avg} = \frac{M_{dep}}{M_{tot}} = \frac{\int_0^{\infty} g(D) f(D) D^3 dD}{\int_0^{\infty} f(D) D^3 dD} \quad (V.3)$$

Dit is in feite gelijk aan de afvangfractie  $\eta$  uit Bijlage IV, vgl.(IV.16). Voor een zeer smalle deeltjesgrootteverdeling (monodisperse verdeling) met grootte  $D^*$  gaat  $g_{avg}$  over in  $g(D^*)$ .

Stel dat de afvangefficiëntie  $g(D)$  kan geschreven worden in de vorm van een polynoom:

$$g(D) = a_0 + a_1 D + a_2 D^2 + a_3 D^3 + \dots + a_n D^n = \sum_{p=0}^n a_p D^p \quad (V.4)$$

Deze uitdrukking bevat  $n+1$  onbekenden (de  $a_p$ 's). Invullen in vgl.(V.2) en de sommatie over  $p$  buiten de integraal halen levert de volgende uitdrukking op voor de afgevangen massa fijnstof:

$$M_{dep} = \frac{\pi}{6} \rho N \sum_{p=0}^n \left( a_p \int_0^{\infty} f(D) D^{p+3} dD \right) \quad (V.5)$$

De integraal is een functie van de grootteverdeling  $f(D)$  en de waarde van  $p$ ; vervang deze integraal door de term  $X_p$ :

$$X_p = \int_0^{\infty} f(D) D^{p+3} dD \quad (V.6)$$

Stel er worden  $q$  metingen gedaan bij verschillende beginconcentraties tracer. Dit levert  $q$  grootteverdelingen op ( $f_1, f_2, \dots$ ). Voor elk van die verdelingen is vgl.(V.5) van toepassing, met in principe verschillende verdelingen  $f(D)$  maar met dezelfde set parameters  $a_p$ . Verder wordt ter vereenvoudiging de constante factor geëlimineerd:

$$Y = \frac{6 M_{dep}}{\pi \rho N} \quad (V.7)$$

Zodoende worden  $q$  uitdrukkingen verkregen met  $n+1$  onbekenden (de parameters  $a_p$ ):

$$\begin{aligned} Y_1 &= a_0 X_{01} + a_1 X_{11} + a_2 X_{21} + \dots + a_n X_{n1} \\ Y_2 &= a_0 X_{02} + a_1 X_{12} + a_2 X_{22} + \dots + a_n X_{n2} \\ &\dots \\ Y_q &= a_0 X_{0q} + a_1 X_{1q} + a_2 X_{2q} + \dots + a_n X_{nq} \end{aligned} \quad (V.8)$$

De eerste index in  $X_{pi}$  geeft de waarde van  $p$  aan, de tweede index het nummer van de meting. Dit is een lineair stelsel vergelijkingen met de  $a_p$ 's als onbekenden. Dit stelsel heeft een eenduidige oplossing als  $q=n+1$ . Voor  $q < n+1$  is er geen oplossing, maar als  $q \geq n+1$  kan een best passende oplossing van de  $a_p$ 's bepaald worden door minimaliseren van de som  $\Psi$  van de kwadraten van de afwijkingen ('kleinste kwadraten methode'):

$$\Psi = \sum_{i=1}^q \left( Y_i - \sum_{p=0}^n a_p X_{pi} \right)^2 \quad (V.9)$$

Dit levert het volgende stelsel vergelijkingen op:

$$\begin{aligned} a_0 \sum_{i=1}^q X_{0i}^2 &+ a_1 \sum_{i=1}^q X_{0i} X_{1i} + a_2 \sum_{i=1}^q X_{0i} X_{2i} + \dots + a_n \sum_{i=1}^q X_{0i} X_{ni} = \sum_{i=1}^q X_{0i} Y_i \\ a_0 \sum_{i=1}^q X_{1i} X_{0i} &+ a_1 \sum_{i=1}^q X_{1i}^2 + a_2 \sum_{i=1}^q X_{1i} X_{2i} + \dots + a_n \sum_{i=1}^q X_{1i} X_{ni} = \sum_{i=1}^q X_{1i} Y_i \\ \dots &\dots \dots \dots \dots \dots \\ a_0 \sum_{i=1}^q X_{ni} X_{0i} &+ a_1 \sum_{i=1}^q X_{ni} X_{1i} + a_2 \sum_{i=1}^q X_{ni} X_{2i} + \dots + a_n \sum_{i=1}^q X_{ni}^2 = \sum_{i=1}^q X_{ni} Y_i \end{aligned} \quad (V.10)$$

met  $n+1$  vergelijkingen en  $n+1$  onbekenden. Hieruit zijn de optimale  $a_p$ 's altijd te bepalen, mits het aantal verschillende grootteverdelingen ( $q$ ) minimaal  $n+1$  bedraagt.

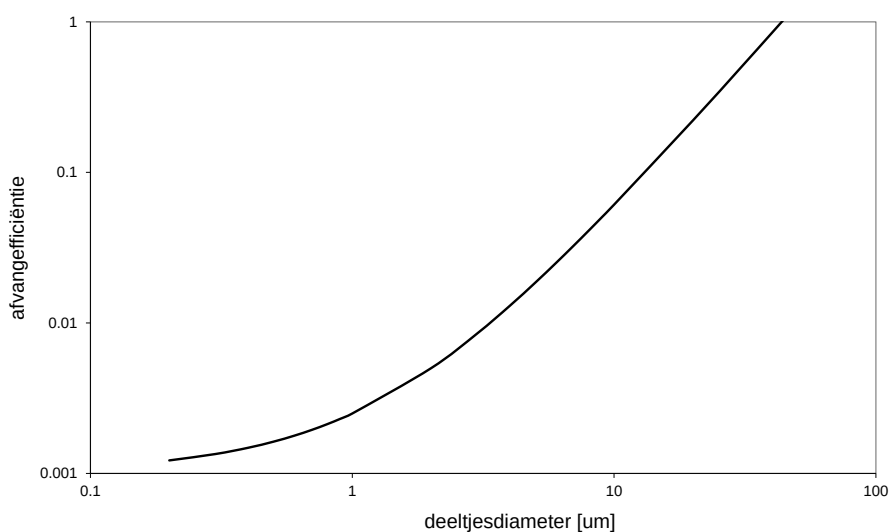
### Onvolledige droging van de deeltjes

Het meetprincipe van de experimenten is gebaseerd op volledige droging van een initiële druppelwolk tot stofdeeltjes met een grootteverdeling die afhangt van de beginconcentratie van de tracer. In praktijk blijkt een volledige droging niet altijd gegarandeerd te kunnen worden. Dit heeft in ieder geval effect op de grootteverdeling  $f(D)$  direct voor de vegetatie. Zodoende kunnen metingen bij dezelfde beginconcentratie toch verschillende deeltjesverdelingen  $f(D)$  opleveren en zijn dus geschikt voor gebruik in bovenstaande methodiek als onafhankelijke metingen. Wel geldt als belangrijk nadeel dat deze grootteverdelingen waarschijnlijk betrekkelijk weinig van elkaar verschillen. Dit heeft als gevolg dat de nauwkeurigheid van de berekende parameters  $a_p$  te wensen over laat.

Een ander effect van onvolledige droging kan zijn dat de afvangkans  $g(D)$  voor droge en natte deeltjes niet gelijk hoeft te zijn. In dat geval is bovenstaande analyse niet bruikbaar.

### **Uitgewerkt voorbeeld**

Veronderstel de afvangkans  $g(D)$  heeft een verloop als in Figuur V.1. Figuur V.1 met een afvangkans van ca. 6% voor deeltjes van  $10\ \mu\text{m}$  en ca. 1% voor deeltjes van  $4\ \mu\text{m}$ . De gekozen functie  $g(D)$  is een tweedegraads polynoom met parameters  $a_0=0.001$ ,  $a_1=0.001$ ,  $a_2=0.0005$ . Dit veronderstelde verloop is volkomen denkbeeldig maar niet onrealistisch. Voor 6 concentraties tussen 0,1 en 1,3 g/l is de stofgrootteverdeling bepaald zoals beschreven in Bijlage III. De benodigde waarden van  $X_p$  worden berekend met vgl.(V.6). In praktijk zal  $M_{\text{dep}}$  (dus  $Y$ ) uit metingen bepaald moeten worden. In dit rekenvoorbeeld wordt verondersteld dat deze metingen zeer precies konden worden uitgevoerd, dus  $Y$  zal dan waarden hebben exact gelijk aan berekende waarden met vgl.(V.8). In dat geval zal terugrekenen naar de parameters  $a_p$  uiteraard exact de vooraf gekozen waarden opleveren.



*Figuur V.1. Veronderstelde afvangefficiëntie als functie van deeltjesgrootte.*

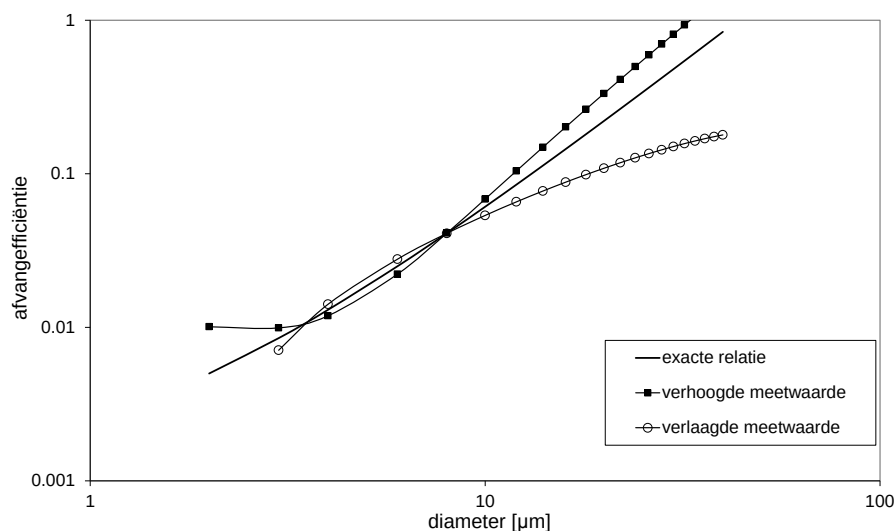
Interessanter is het om nu te bekijken hoe gevoelig berekende fits van  $g(D)$  zijn voor afwijkingen in de meetwaarden  $Y$ . Een afwijking van 5% in het gemeten monstervolume bij 1,3 g/l levert sterk afwijkende efficiënties op (zie Figuur V.2), namelijk niet alleen voor grotere deeltjes maar juist ook voor zeer kleine deeltjes. De gevoeligheid voor onnauwkeurigheden in de meetwaarden  $Y$  blijkt af te nemen voor lagere tracerconcentraties (dus fijnere stofdeeltjes). Zo laat Figuur V.3 zien dat een 20% variatie in de gemeten depositie ( $Y$ ) bij concentratie 0,4 g/L maar beperkt van invloed is op de berekende afvangkansverdeling. Bij 0,1 g/L heeft zelfs een afwijking van 50% in de meetwaarde slechts relatief weinig invloed op de berekende afvangkansen (Figuur V.4). Deze eenvoudige set variaties toont aan dat onnauwkeurigheden in gemeten stofdeposities bij de hogere tracerconcentraties zeer sterk doorwerken in de berekende afvangefficiëntie. Bij lagere concentraties zijn dergelijke onnauwkeurigheden in de metingen veel minder van invloed op het eindresultaat. In alle gevallen zijn de afvangefficiënties voor kleine deeltjes (ruwweg  $<3\ \mu\text{m}$ ) gevoelig voor meetfouten.

Ten slotte is bij wijze van test de exacte waarde van de  $Y$ 's gevarieerd door een willekeurige afwijking tussen -10% en +10% van de exacte waarde toe te staan. Bij herhaling levert dit een groot aantal curves op voor de afvangefficiëntie, zoals in Figuur V.5. Bij grote en bij kleine deeltjes is de kans groot dat de berekende afvangkans  $g(D)$  flink afwijkt van de vooraf ingestelde afvangkansen. Opvallend is dat het middengebiet redelijk stabiel is; dit is het diameterbereik waarbinnen de meeste stofdeeltjes liggen in deze berekeningen.

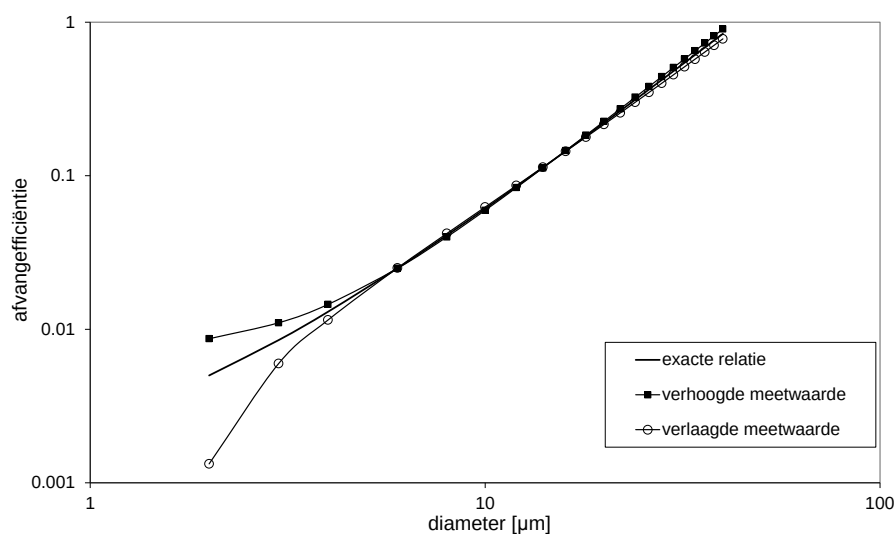
### Voorlopige conclusies

Op basis van bovenstaande voorbeeldberekeningen kan het volgende gezegd worden:

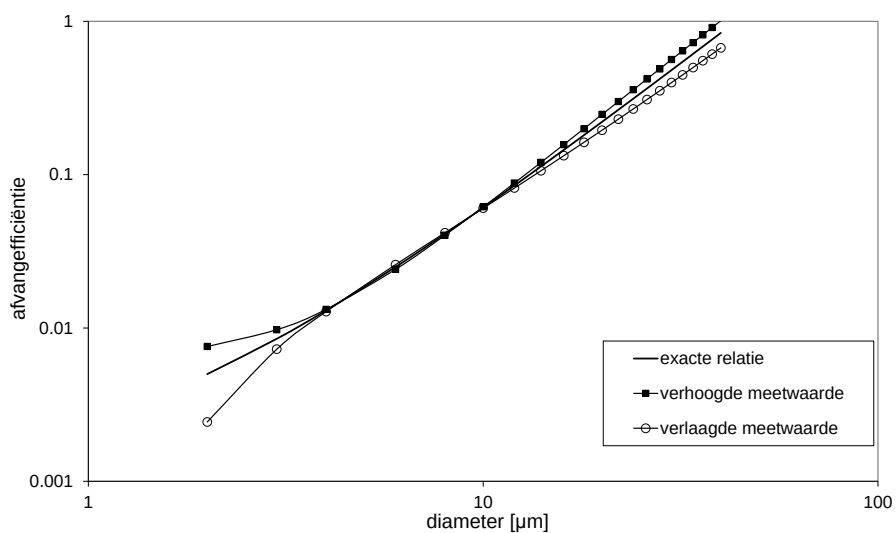
- Ook voor verdelingen van deeltjesgroottes kan uit herhaalde metingen bij verschillende beginconcentraties een afvang efficiëntie als functie van deeltjesgrootte bepaald worden.
- Onzekerheden in de berekende functie  $g(D)$  worden vooral bepaald door onzekerheden in gemeten stofdeposities bij de hogere beginconcentraties. Door bij deze concentraties meer depositiemetingen te doen, kan de nauwkeurigheid toenemen.
- Een afvang efficiëntie  $g(D)$  kan niet volkomen onafhankelijk bepaald worden; er moet vooraf een aanname gedaan worden wat betreft de relatie tussen  $g$  en  $D$ . Hoe meer parameters deze empirische relatie bevat, des te meer metingen er gedaan moeten worden. Het aantal metingen moet minimaal even groot zijn als het aantal te bepalen parameters.



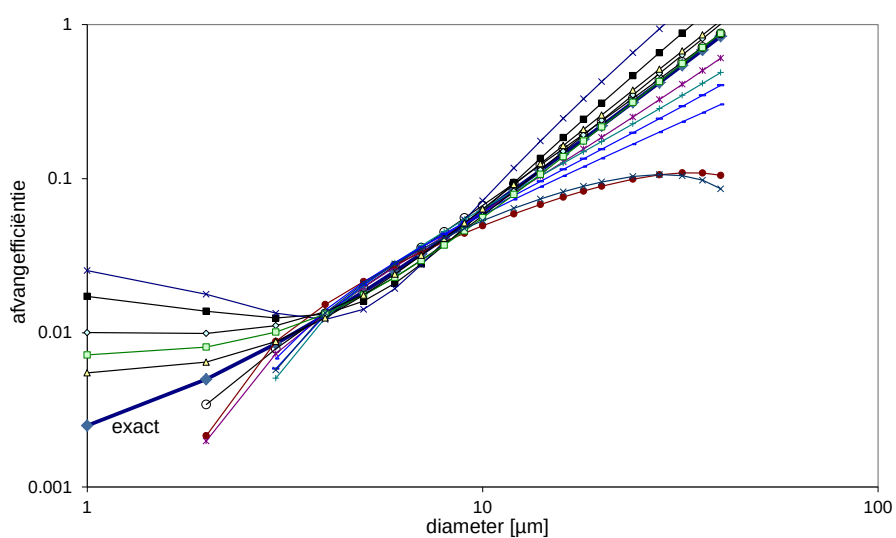
Figuur V.2. Veranderingen in gefitte afvang efficiëntie als de meting bij hoogste concentratie (1,3 g/L) 5% deviatie kent.



Figuur V.3. Veranderingen in gefitte afvang efficiëntie als de meting bij een middelgrote (0,4 g/L) 20% deviatie kent.



Figuur V.4. Veranderingen in gefitte afvang efficiëntie als meting bij een lage concentratie (0,1 g/L) 50% deviatie kent.



Figuur V.5. Gefitte afvang efficiënties als functie van de deeltjesgrootte; bij tracerconcentraties in de range 0,1-1,3 g/L en een willekeurige meetfout tussen -10 en +10% in de depositie voor elke concentratie.





## Bijlage VI.

### Opstuwing van lucht over het gewas

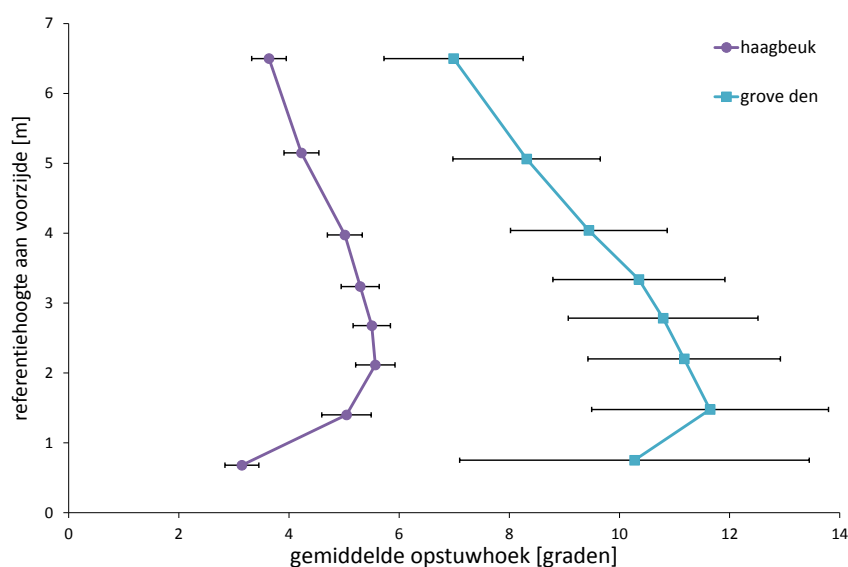
In Bijlage IV is voor de massabalans van stofdeeltjes de 'luchtbalansmethode' gehanteerd. Deze methode gaat ervan uit dat de luchtflux voor en achter de bomenhaag gelijk moet zijn voor een eerlijke stofbalans. Omdat de windsnelheden achter de bomen lager zullen zijn dan ervoor, moet aan de achterkant tot een grotere hoogte geïntegreerd worden. Voor de totale stofbalans ligt het voor de hand om aan de voorzijde tot de grootst mogelijke hoogte te integreren (tot zover er meetpunten zijn); dit betekent tot een hoogte van 6,5 m (zie ook bijv. Par. 3.4).

In principe kan de luchtbalans natuurlijk voor elke hoogte toegepast worden. Stel aan de voorzijde wordt geïntegreerd tot een hoogte  $H_1$ , en aan de achterzijde tot een hoogte  $H_2$ , zodanig dat de totale luchtflux in beide gevallen gelijk is. Gewoonlijk zal dus  $H_2 > H_1$  zijn. De beide locaties zijn de masten voor en achter de bomen, met een afstand  $L = 7$  m ertussen. Wordt verondersteld dat de lucht uit niet mengende lagen is opgebouwd, dan moet de luchtlaag die zich aan de voorzijde op hoogte  $H_1$  bevindt, opgestuwd worden tot een hoogte  $H_2$  bij de achterste mast. Gemiddeld over de afstand  $L$  stijgt de lucht dan onder de volgende hoek:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{H_2 - H_1}{L}\right) \quad (\text{VI.1})$$

Deze 'opstuwhoek' is voor elke meethoogte bepaald en voor elk experiment met bomen. In Figuur VI.1 wordt voor haagbeuk en grove den de opstuwhoek gegeven tegen de integratiehoogte op de voorste mast. Met grove den zijn 9 experimenten gedaan; het profiel geeft het gemiddelde over deze 9 experimenten weer. De foutenbalk is de standaardafwijking in de opstuwhoek over deze experimenten. Evenzo is gemiddelde en standaardafwijking voor de 3 experimenten met haagbeuk weergegeven. De bomenhaag van grove den is veel dichter dan die van haagbeuk, wat duidelijk tot uiting komt in de grotere opstuwing bij grove den. Dicht bij de grond is de opstuwing betrekkelijk gering, mogelijk doordat daar het gewas onderin minder dicht is en de lucht er betrekkelijk eenvoudig onderdoor kan waaien. De grootste opstuwhoek wordt bereikt ongeveer op 2 m hoogte, dus nabij de boomhoogte.

De variatie in opstuwhoek bij grove den lijkt groter dan bij haagbeuk. De reden hiervan is niet geheel duidelijk. Er lijkt een correlatie te bestaan tussen opstuwhoek en gemiddelde windsnelheid, maar die is slechts zwak. Een correlatie met windrichting lijkt ook voor de hand te liggen, maar dat kwam niet tot uiting in de metingen.



Figuur VI.1. Gemiddelde opstuwhoek over de bomenhaag als functie van de hoogte op de voorste mast; op basis van luchtbalans.



## Bijlage VII.

### Effect van LAD op afvangst

Afvangst van fijnstof door bomen hangt nauw samen met de hoeveelheid blad of takken. De 'leaf area density' (LAD) is de oppervlakte aan bladeren en/of takken per volume-eenheid boom. Dit is een zinvolle grootheid in samenhang tot de afvangst. Veronderstel dat de deeltjesflux door de bomen exponentieel afneemt met de afstand:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-p \cdot LAD \cdot x} \quad (\text{VII.1})$$

Hierin is  $\Phi_0$  de flux tot boomhoogte, vlak voor de bomen;  $x$  is de afstand in de bomenhaag, gemeten vanaf de voorkant;  $p$  is een nog te bepalen constante (dimensieloos), welke een maat is voor de intrinsieke capaciteit van de boom om deeltjes af te vangen.

Veronderstel in een eerste vereenvoudiging dat depositie op de grond te verwaarlozen is en dat opstuwning geen rol speelt. De afname in flux komt dan geheel voor rekening van de afvangst door het gewas. De cumulatieve afvangst door de bomen wordt dan gegeven door:

$$\Phi_{afv} = \Phi_0 - \Phi_0 e^{-px} = \Phi_0 (1 - e^{-p \cdot LAD \cdot x}) \quad (\text{VII.2})$$

Is de totale diepte van de bomenhaag gelijk aan  $L$ , en is de totale afvangst bekend uit meting, dan kan de constante  $p$  bepaald worden uit:

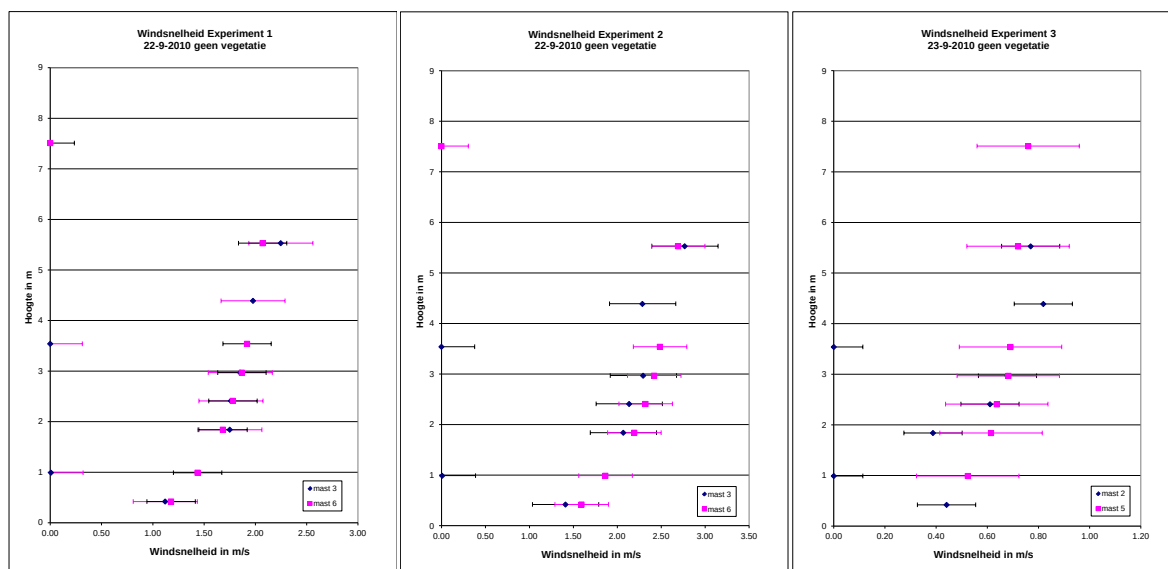
$$p = \frac{-1}{L \cdot LAD} \ln \left( 1 - \frac{\Phi_{afv}}{\Phi_0} \right) \quad (\text{VII.3})$$



## Bijlage VIII.

### Windsnelheidsprofielen

In 2010 zijn de experimenten gestart met controle metingen op windsnelheidsprofielen en fluxmetingen voor de tracer zonder aanwezigheid van de bomenhaag. De windsnelheid profielen voor de eerste drie experimenten zijn weergegeven in Figuur VIII.1.



Figuur VIII. 1. Windsnelheidsprofielen op voorste en achterste meetmast zonder vegetatie in 2010.

Niet alle anemometers waren gedurende deze drie experimenten aangesloten. De grootste verschillen zijn te zien bij de laagste windsnelheid in experiment 3. Dit is te verwachten op basis van verschillen in aanloopsnelheid en remtijd van de anemometers. Een aantal meters stonden gedurende een bepaalde tijd stil, terwijl andere door draaiden.

Gedurende de experimenten in 2011 zijn twee metingen verricht zonder vegetatie. De resultaten lieten een grotere spreiding tussen de metingen zien. Dat duidde op een verloop van het signaal gedurende de tijd van opslag en herplaatsing in de masten. Dit vormde de aanleiding om alle anemometers op een onderlinge afstand van 80 cm horizontaal naast elkaar op een balk te plaatsen en het signaal te vergelijken bij windhoeken binnen 45 graden loodrecht van voren op de meetbalk. Herijking is overwogen, maar bleek kostentechnisch niet uitvoerbaar. Het gemiddelde van de onderste zeven (nieuwe) anemometers die op de achterste mast hadden gezeten werd aangenomen als beste schatting van de werkelijke windsnelheid. Tegen dat gemiddelde werden alle individuele meters afgezet om de empirische correctiefactoren te verkrijgen. De anemometer, die op de bovenste positie van de achterste mast had gezeten deed in dit gemiddelde niet mee, omdat uit de gemeten profielen duidelijk was, dat deze anemometer meer van de rest afweek dan de andere.

Een lijst van empirische correctiefactoren wordt gegeven in Figuur VIII.1. Deze factoren zijn gebruikt voor alle in 2011 uitgevoerde metingen.

Een aantal zaken worden uit deze Tabel duidelijk:

1. De meeste nieuwe anemometers (A09 t/m A16) vertonen een gering verloop (binnen 4%).
2. Enkele nieuwe anemometers verlopen sterker (A09, A12, A13 en A16) tot wel 9%. Het blijkt dat deze meters ook een veel grotere spreiding t.o.v. het gemiddelde van A10 t/m A16 vertonen.
3. Het verloop in de oude anemometers is groter (3 – 20%).
4. Anemometer A01 is onbruikbaar geworden.

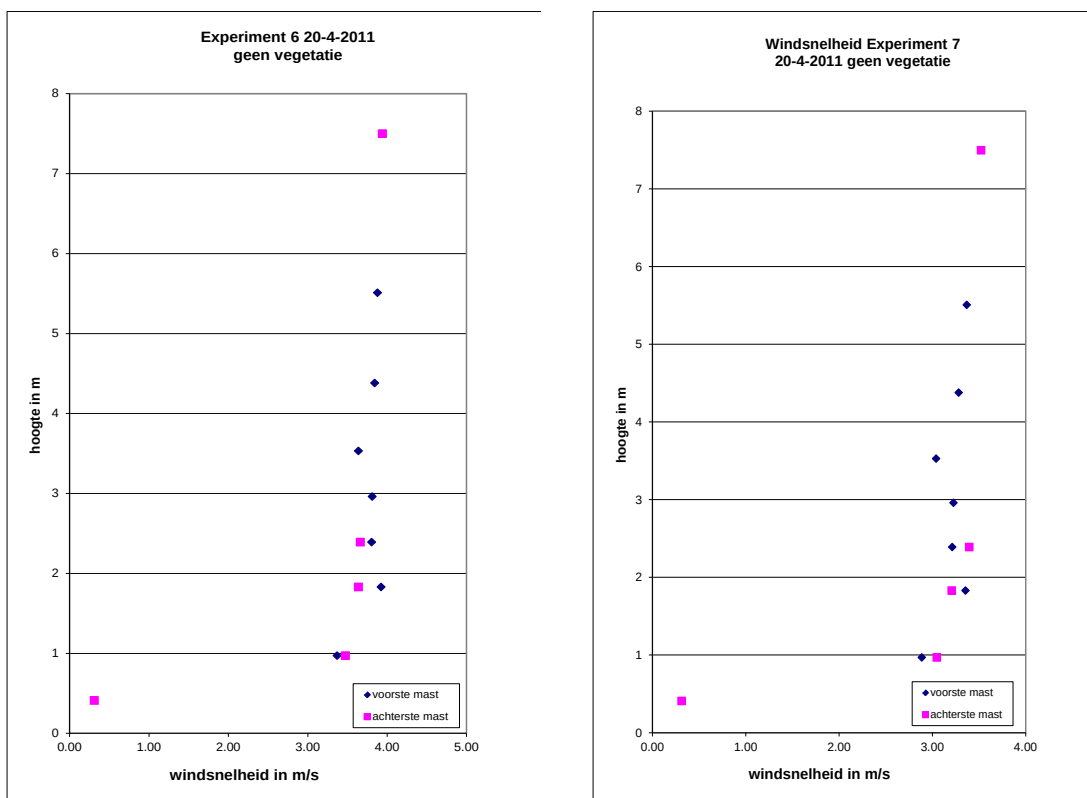
Met behulp van deze correctiefactoren zijn de windsnelheidsprofielen voor de experimenten in 2011 berekend. De windsnelheidsprofielen voor de experimenten 6 en 7 (zonder vegetatie) zijn weergegeven in Figuur VIII.2.

In Figuur VIII.3 worden de windsnelheidsprofielen getoond voor de experimenten 4 en 5 in 2010.

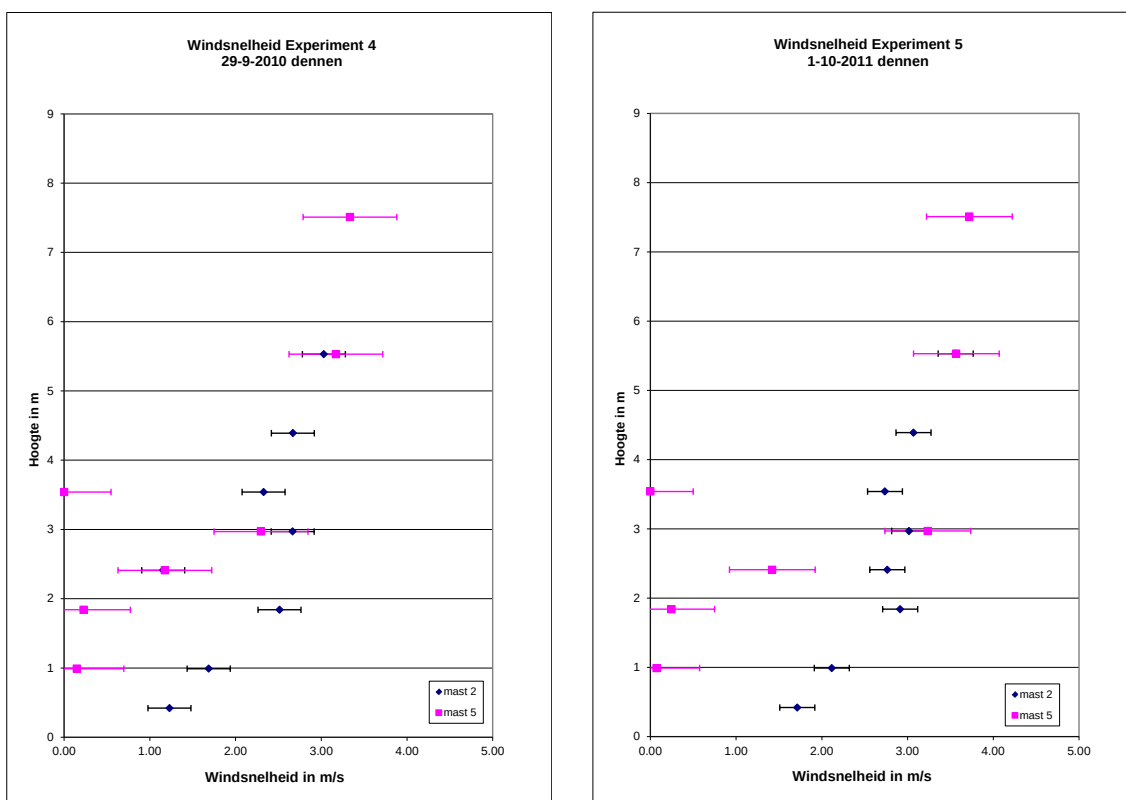
De windsnelheidsprofielen voor de experimenten in 2011 worden getoond in Figuur VIII.4.

*Tabel VIII. 1. Overzicht van empirische correctiefactoren op de anemometer signalen in 2011, gebaseerd op parallelle horizontale metingen op gelijke hoogte bij vrijwel loodrecht aanstromende wind. Lklijn vorm voor A01 is  $y=ax^2+bx+c$  tot en met 3 m/s, en boven de 3m/s en voor de overige meters  $y=ax + b$  met  $U \text{ werkelijk} = (Azz-b)/a$ .*

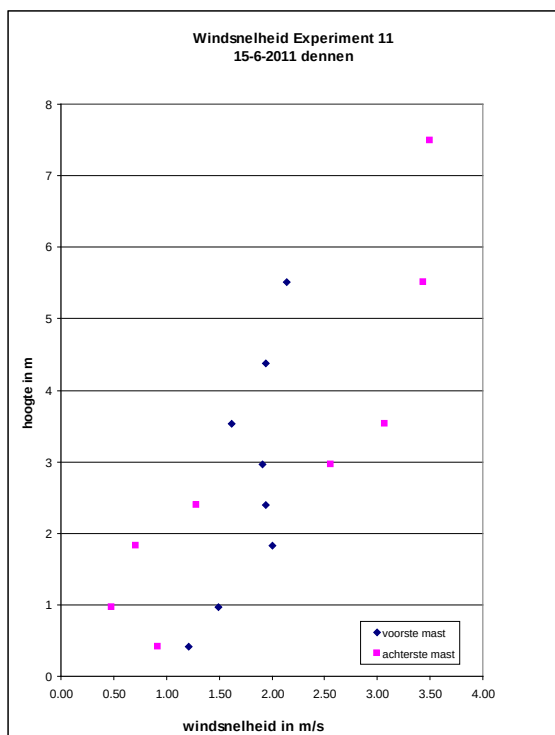
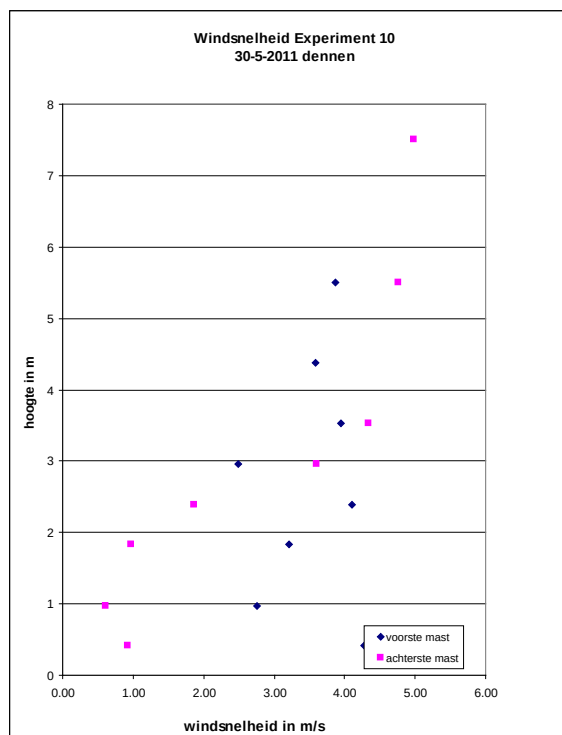
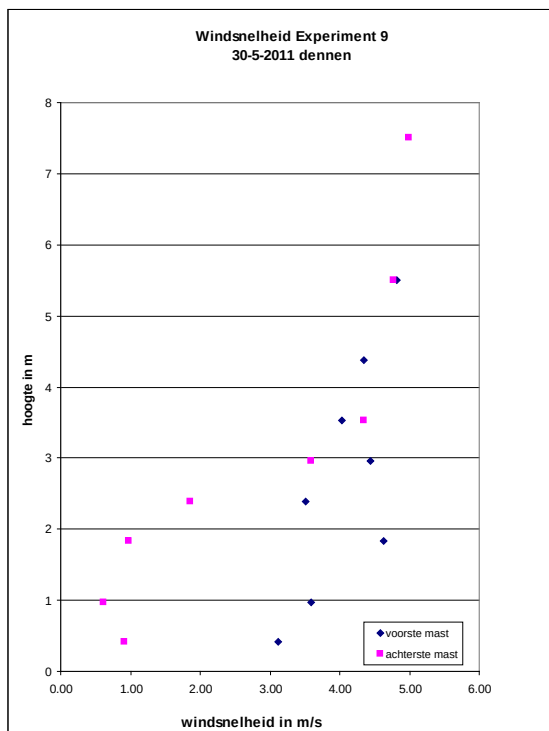
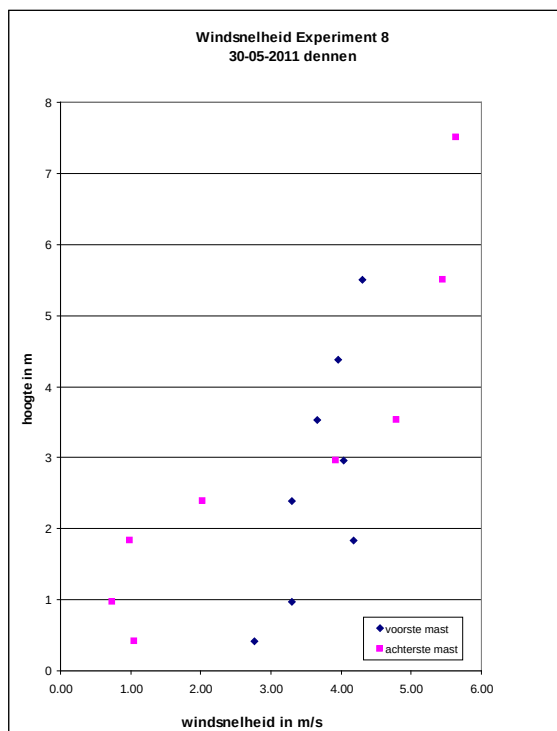
|     | U < 1,5 m/s |        |         | 1,5 < U < 3 m/s |        |        | U > 3 m/s |         |
|-----|-------------|--------|---------|-----------------|--------|--------|-----------|---------|
|     | a           | b      | c       | a               | b      | c      | a         | b       |
| A01 | 0,487       | 0,620  | □-0,109 | 0,373           | 1,264  | -0,804 | 5,739     | -11,621 |
| A02 | 1,039       | -0,151 |         | 1,020           | -0,114 |        | 1,041     | -0,189  |
| A03 | 1,161       | -0,334 |         | 1,092           | -0,239 |        | 1,095     | -0,269  |
| A04 | 1,133       | 0,102  |         | 1,080           | 0,191  |        | 1,080     | 0,179   |
| A05 | 1,194       | -0,146 |         | 1,104           | -0,016 |        | 1,104     | -0,019  |
| A06 | 1,206       | -0,391 |         | 1,086           | -0,234 |        | 1,107     | -0,315  |
| A07 | 1,100       | -0,119 |         | 1,093           | -0,104 |        | 1,106     | -0,157  |
| A08 | 1,014       | -0,055 |         | 1,043           | -0,093 |        | 1,027     | -0,045  |
| A09 | 0,916       | 0,056  |         | 0,949           | 0,014  |        | 0,956     | -0,009  |
| A10 | 0,996       | 0,033  |         | 1,000           | 0,034  |        | 0,992     | 0,056   |
| A11 | 1,028       | 0,029  |         | 1,009           | 0,044  |        | 1,017     | 0,017   |
| A12 | 0,929       | 0,082  |         | 0,967           | 0,078  |        | 0,975     | 0,052   |
| A13 | 0,932       | 0,092  |         | 1,005           | -0,019 |        | 0,999     | 0,007   |
| A14 | 1,039       | -0,090 |         | 1,033           | -0,091 |        | 1,032     | -0,083  |
| A15 | 1,042       | -0,139 |         | 1,006           | -0,113 |        | 1,002     | -0,091  |
| A16 | 0,929       | 0,192  |         | 0,999           | 0,048  |        | 0,942     | 0,188   |



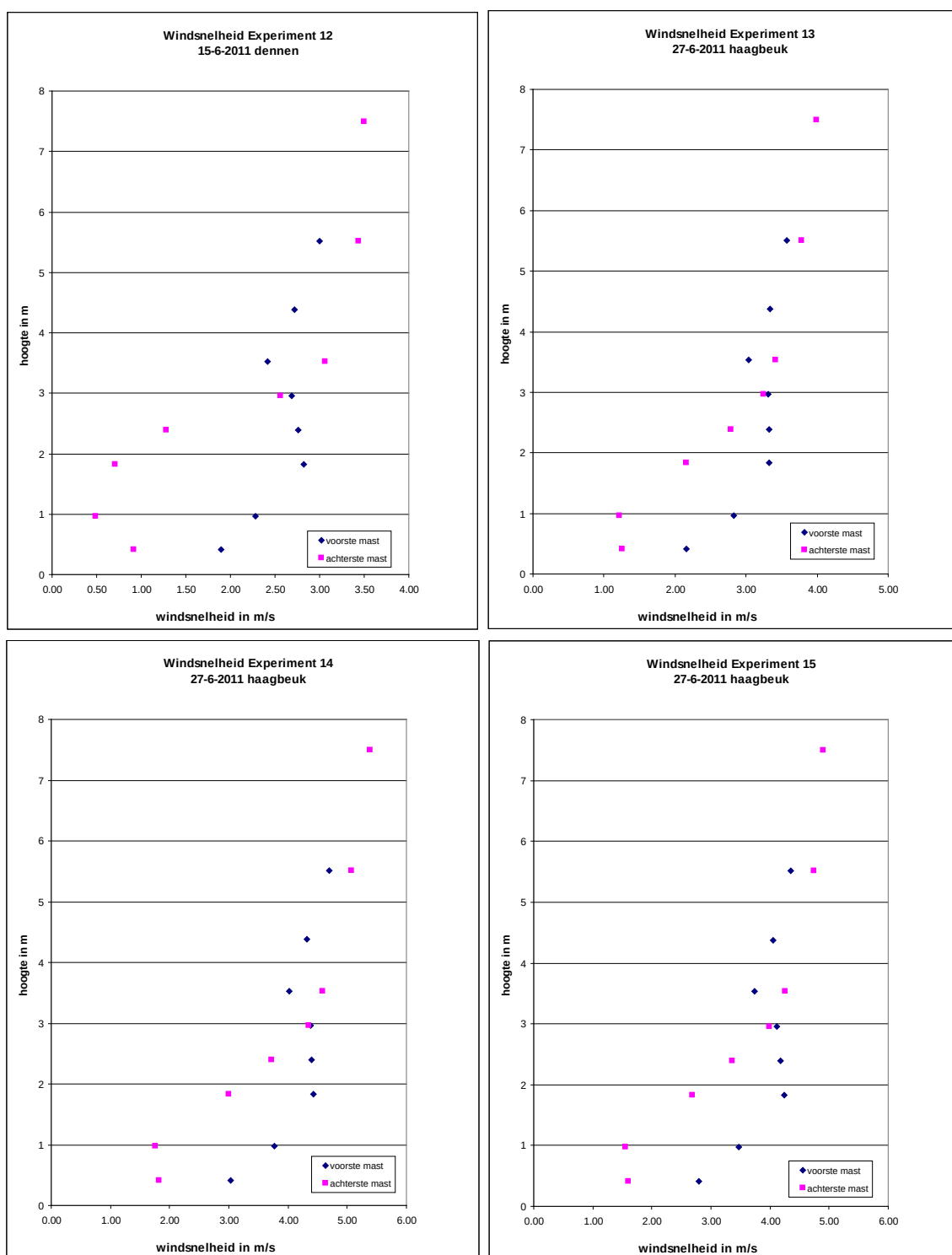
Figuur VIII. 2. Windsnelheidsprofielen op 20 april 2011 bij experimenten zonder vegetatie.



Figuur VIII. 3. Windsnelheidsprofielen op 29 september en 1 oktober 2010 bij experimenten met dennen.







Figuur VIII. 4. Windprofielen voor de experimenten 8 t/m 12 met dennen, en voor experimenten 13 t/m 15 met haagbeuk.

