



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

# Het effect

# van

# vegetatie

# op de luchtkv

Het effect van vegetatie op de luchtkwaliteit

Update 2011



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

## **Het effect van vegetatie op de luchtkwaliteit**

Update 2011

RIVM Rapport 680705019/2011

## Colofon

© RIVM 2011

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: 'Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave'.

J. Wesseling  
S. van der Zee, GGD Amsterdam  
A. van Overveld

Contact:  
J. Wesseling  
RIVM/MEV/CMM

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van ministerie van Infrastructuur en Milieu, in het kader van project Stedelijke luchtkwaliteit en Mrv.



## Rapport in het kort

### **Het effect van vegetatie op de luchtkwaliteit**

Vegetatie (bomen en planten) kan de luchtkwaliteit in een stad niet significant verbeteren en kan die zelfs verslechteren. Door de aanwezigheid van vegetatie in of langs straten met verkeer neemt de windsnelheid in die straat namelijk af. Als gevolg hiervan gaan de concentraties van alle stoffen die door het verkeer worden uitgestoten omhoog. De aanwezigheid van vegetatie in een groot gebied kan wel de achtergrondconcentraties van stikstofdioxide en fijn stof positief beïnvloeden, maar het effect is zeer beperkt – in de orde van een half procent tot mogelijk enkele procenten bij grootschalige extra inzet van vegetatie. De onzekerheid hierover in verschillende studies is aanzienlijk.

Dit blijkt uit een recente studie van het RIVM en de GGD Amsterdam naar de relatie tussen vegetatie en luchtkwaliteit, in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Milieu. De resultaten bevestigen de uitkomsten van het overzicht dat het RIVM in 2008 heeft gemaakt van de toen beschikbare concrete gegevens over het effect van vegetatie op luchtkwaliteit. In Nederland liepen toen nog verschillende (grootschalige) onderzoeken naar de effecten hiervan langs snelwegen en naar de combinaties van geluidsschermen met vegetatie.

Het RIVM en de GGD Amsterdam hebben het bestaande overzicht uitgebreid met alle beschikbare concrete gegevens over vegetatie en luchtkwaliteit van de laatste jaren. Het onderzoek is vooral op de stoffen stikstofdioxide en fijn stof gericht vanwege hun relatief hoge concentraties ten opzichte van Europese normen voor de luchtkwaliteit. Uiteraard heeft vegetatie veel meer invloed op gezondheid en milieu dan alleen via concentratieniveaus. Verschillende studies tonen het overwegend positieve effecten van vegetatie op de gezondheid in het algemeen, deze worden in het voorliggende rapport slechts kort besproken.

Trefwoorden:  
luchtkwaliteit, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> vegetatie



## Abstract

### **The effects of vegetation on air quality**

Vegetation (trees and plants) cannot significantly improve air quality in a city and could even make it worse. Due to the presence of vegetation in or along streets with traffic, wind speed in the street actually diminishes. As a result, concentrations of all the substances emitted by traffic increase. The presence of vegetation in a large area can have a positive influence on background concentrations of nitrogen dioxide and particulate matter, but the effect is very limited – on the order of a half per cent to possibly a few per cent with large-scale extra deployment of vegetation. The uncertainty about this is considerable in different studies.

This has been shown in a recent study by the RIVM and GGD Amsterdam into the relationship between vegetation and air quality, at the request of the Ministry of Infrastructure and the Environment. The results confirm the outcomes of the overview made in 2008 by the RIVM of the data then available on the effects of vegetation on air quality. In the Netherlands, various (large-scale) studies were then ongoing into the effects of vegetation along the motorways and into combinations of noise barriers with vegetation.

The RIVM and GGD Amsterdam have expanded the existing overview with the data that have become available on vegetation and air quality in recent years. The research especially focuses on nitrogen dioxide and fine dust particles, due to their relatively high concentrations compared to European air quality standards. Of course vegetation influences public health and the environment in more ways than just by concentration levels. Several studies have shown positive effects of vegetation on public health. These studies are discussed only shortly in the report.

#### Key Words

air quality, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> vegetation



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding—9</b>
1.1	Opzet van het rapport—9
<b>2</b>	<b>Groen, gezondheid en luchtkwaliteit—11</b>
2.1	Groen en gezondheid—11
2.2	Luchtkwaliteit en gezondheid—12
2.3	Blootstelling aan luchtverontreiniging: de rol van groen—13
<b>3</b>	<b>Basisinteractie van vegetatie en luchtkwaliteit—15</b>
3.1	Gassen—15
3.2	Processen bij depositie van deeltjes—17
<b>4</b>	<b>Luchtkwaliteit en vegetatie bij een weg—21</b>
4.1	Stroming, luchtkwaliteit en vegetatie bij een weg—21
4.2	De street canyon zonder bomen—24
4.3	De street canyon met bomen—26
4.4	Een vrij liggende weg—30
4.5	Vrij liggende weg met bomen en/of vegetatie—30
4.6	Samenvatting—34
<b>5</b>	<b>Gebiedsgerichte inzet van vegetatie—35</b>
5.1	Gebiedsgerichte studies—35
5.2	Kleine gebieden—38
5.3	Groene daken—39
5.4	Lokale effecten—39
5.5	Samenvatting—39
<b>6</b>	<b>Recent onderzoek langs wegen en in straten—41</b>
6.1	Onderzoek van het InnovatiePlatform Luchtkwaliteit (IPL)—41
6.1.1	Onderzoek Valburg—42
6.1.2	Aanvullend onderzoek Valburg—43
6.1.3	Onderzoek Vaassen—43
6.1.4	Proeftuin schermen IPL—45
6.1.5	Toepassingsadvies Rijkswaterstaat—46
6.2	Geluidswal in combinatie met vegetatie—46
6.3	Binnenstedelijk effect van vegetatie—47
6.4	Studies door het VITO—48
6.4.1	Lage haag of scherm langs provinciale weg Waalre—48
6.4.2	Street canyon met bomen—49
6.5	Windtunnelonderzoek Duitsland en numerieke modellen—52
6.6	Metingen aan ultrafijne deeltjes—53
6.7	Conferentie 'Local Air Quality and its Interactions with Vegetation'—54
6.8	Samenvatting—55
<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen—57</b>
	Referenties—59





# 1 Inleiding

In 2008 is er een rapport van het RIVM verschenen, 'Effecten van groen op de luchtkwaliteit. Status 2008' (Wesseling, 2008). Het RIVM heeft daarin een overzicht gemaakt van de toen beschikbare concrete gegevens ten aanzien van vegetatie<sup>1</sup> en luchtkwaliteit. Op basis van de beschikbare informatie concludeerde het RIVM dat de effecten van groen op de fijn stof (PM<sub>10</sub>) concentraties in en om een stad beperkt zijn. In Nederland liepen toen nog verschillende onderzoeken naar de effecten van vegetatie op de luchtkwaliteit langs snelwegen en naar de combinaties van geluidsschermen met groen. Als gevolg kon bijvoorbeeld niet worden uitgesloten dat de inzichten in de effecten van groenstroken langs rijkswegen in de loop van 2009/2010 nog iets zouden veranderen. In het voorliggende rapport worden de resultaten van de projecten die in 2008 nog liepen besproken. Ook zullen enkele metingen en berekeningen die de afgelopen jaren in Nederland zijn uitgevoerd worden besproken. In 2008 waren er praktisch geen metingen of berekeningen aan de effecten van vegetatie op ultrafijn stof bekend. Omdat er de afgelopen jaren resultaten van enkele studies op dit gebied zijn gepubliceerd worden die ook kort besproken.

Omdat het rapport in 2008 niet wezenlijk op de processen inging die de invloed van vegetatie op de luchtkwaliteit (mede) bepalen, zal dat in het voorliggende rapport wel worden gedaan. Door beter te begrijpen wat er precies gebeurt, kan ook beter worden begrepen waarom bepaalde effecten worden gemeten of berekend.

Evenals in het rapport uit 2008 is de centrale vraag of de inzet van groen de blootstelling aan luchtverontreiniging, en daarmee de volksgezondheid, kan beïnvloeden. Om die reden wordt de nadruk gelegd op (wetenschappelijke) studies die zijn gericht op metingen of modellering van de luchtkwaliteit. Teksten en documenten die meer zijn gericht op promotie van vegetatie, zonder onderbouwing van belang, worden niet besproken.

## 1.1 Opzet van het rapport

In de komende hoofdstukken wordt bij verschillende vragen met betrekking tot de effecten van vegetatie op de luchtkwaliteit stilgestaan. De volgende aspecten zullen daarbij worden besproken:

<sup>1</sup> Onder vegetatie wordt vooral bomen, struiken verstaan. Dak- en/of gevelgroen valt ook binnen definitie.

- Groen, gezondheid en luchtkwaliteit:  
Wat zijn de positieve effecten van groen op de luchtkwaliteit, hoe beïnvloedt luchtkwaliteit de gezondheid en op welke wijze beïnvloedt vegetatie de blootstelling aan luchtverontreiniging?
- Basisinteractie van vegetatie en luchtkwaliteit:  
Wat zijn in het algemeen nu de belangrijkste processen en hoe beïnvloeden zij elkaar?
- Luchtkwaliteit en vegetatie bij een weg:  
Wat gebeurt er precies in de situatie van een straat met vegetatie daarin of langs een met vegetatie omgeven weg?
- Gebiedsgerichte inzet van vegetatie:  
(Hoe) kan vegetatie worden ingezet om de luchtkwaliteit in een (groter) gebied te beïnvloeden?
- Resultaten van recent onderzoek (in Nederland):  
Wat is er sinds 2008 verder bekend geworden uit de toen lopende of uit nieuwe onderzoeken? Ook worden enkele resultaten voor ultrafijn stof besproken.
- Andere recente informatie.

## 2 Groen, gezondheid en luchtkwaliteit

### 2.1 Groen en gezondheid

Het voorliggende rapport bespreekt de interactie tussen vegetatie en luchtkwaliteit. Uiteraard heeft 'groen' veel meer invloed op gezondheid en milieu dan alleen concentratieniveaus. Groen heeft overwegend positieve effecten op de gezondheid. De Gezondheidsraad beschrijft in haar advies<sup>2</sup> 'Natuur en gezondheid' (2004) verschillende manieren waarop groen een positief effect kan hebben op de gezondheid.

#### Onderzoek 'Vitamine G'

In het proefschrift 'Vitamine G' van Maas (2009) is onderzocht of, en in hoeverre, de hoeveelheid groen in de woonomgeving van mensen samenhangt met de gezondheid van mensen. In het proefschrift wordt geconcludeerd dat de hoeveelheid groen in de woonomgeving van mensen positief geassocieerd is met de ervaren gezondheid van bewoners. Een stedelijke of plattelandse woonomgeving maakt hier niet veel voor uit. Evenmin maakt het niet veel uit of het groen zich binnen een kilometer of binnen drie kilometer bevindt. De kans dat iemand zich ongezond voelt is volgens het onderzoek voor mensen woonachtig in weinig groene omgevingen in het algemeen anderhalf keer zo groot als voor mensen woonachtig in heel groene omgevingen. Dit gaat echter niet voor alle specifieke ziektes op. Als voorbeeld noemt de auteur dat kans op één van de ziekteclusters die sterk gerelateerd is aan de hoeveelheid groen in de woonomgeving, namelijk depressie, een derde keer zo hoog is als wanneer men in een woonomgeving woont met weinig groen.

Verschillende mechanismen zijn in het proefschrift besproken om de gevonden relaties te verklaren. Een belangrijk mechanisme dat niet specifiek is besproken in het proefschrift, maar dat volgens de auteur wel belangrijk kan zijn bij het verklaren van de relatie tussen groen en gezondheid, is luchtkwaliteit. Toekomstig onderzoek zou volgens de auteur bij de verklaring van de relatie tussen groen en gezondheid dan ook rekening moeten houden met de rol van luchtkwaliteit.

Naast de effecten op de (ervaren) gezondheid geven bomen schaduw en heeft stedelijk groen een verkoelende werking en gaat het aldus 'heat' islands tegen.

<sup>2</sup> <http://www.gezondheidsraad.nl/nl/adviezen/natuur-en-gezondheid-invloed-van-natuur-op-sociaal-psychisch-en-lichamelijk-welbevinden>

Negatieve effecten van groen zijn er ook: sommige bomen emitteren vluchtige organische stoffen en kunnen bijdragen aan hogere ozonconcentraties (Leung, 2011). Ook kunnen pollen en schimmelsporen afkomstig van bomen de gezondheid van allergische en/of astmatische personen negatief beïnvloeden. Dit kan met name in drukke straten een rol spelen. In drukke straten zijn de NO<sub>2</sub>-concentraties hoger en blootstelling aan NO<sub>2</sub> kan leiden tot een versterkte reactie op allergenen (Barck, 2005; Pattenden, 2006).

## 2.2 Luchtkwaliteit en gezondheid

Voor een uitgebreid overzicht van luchtkwaliteit en gezondheid wordt verwezen naar de landelijke GGD-richtlijn Luchtkwaliteit en Gezondheid (Van der Zee en Walda, 2008). Hieronder volgt een kort overzicht.

Verontreinigde lucht is een complex mengsel dat varieert in samenstelling en gehalte. Fijn stof is de meest schadelijke component van het mengsel. Fijn stof is een verzamelnaam voor in de lucht zwevende stofdeeltjes die variëren in grootte, herkomst en samenstelling. Er is wetgeving voor fijn stof gedefinieerd als PM<sub>10</sub>: de massaconcentratie van deeltjes met een diameter kleiner dan 10 micrometer. De mate waarin stofdeeltjes kunnen doordringen in longen en luchtwegen is afhankelijk van de grootte van de deeltjes. In het algemeen geldt: hoe kleiner de diameter, hoe dieper zij in luchtwegen en longen doordringen. Ultrafijne stofdeeltjes (deeltjes kleiner dan 0,1 micrometer) kunnen na inademing zelfs tot in de bloedbaan doordringen. Blootstelling aan fijn stof kan leiden tot vermindering van de longfunctie, toename van luchtweg- en hart- en vaataandoeningen, toename van ziekenhuisopnames en vervroegde sterfte (Van der Zee en Walda, 2008).

Steeds duidelijker komt uit epidemiologisch onderzoek naar voren dat de uitstoot van het wegverkeer de gezondheid van omwonenden nadelig beïnvloedt. Het lokale verkeer beïnvloedt de fijnstofconcentratie op twee manieren, namelijk door directe uitstoot van (zeer) fijne stofdeeltjes uit de uitlaat, en door opwervend bodemstof. Met name de (zeer) fijne deeltjes (< 0,1 µm) die direct worden uitgestoten lijken een rol te spelen bij het veroorzaken van gezondheidseffecten. Het grovere, opgewervelde stof wordt in mindere mate verantwoordelijk gehouden voor het optreden van gezondheidseffecten, al zijn er aanwijzingen dat ook deze fractie verantwoordelijk kan zijn voor (een deel van de) gezondheidseffecten langs drukke wegen (HEI, 2010).

De zeer fijne stofdeeltjes die door het verkeer worden uitgestoten dragen maar weinig bij aan de PM<sub>10</sub>-concentratie, die immers is gedefinieerd als: de

massaconcentraties van deeltjes kleiner dan 10 micrometer. Ook aan de PM<sub>2,5</sub>-concentratie dragen deze deeltjes, door hun geringe gewicht, relatief weinig bij. Onlangs is een review van het beschikbare onderzoek door het Amerikaanse Health Effects Institute uitgevoerd (HEI, 2010).

NO<sub>2</sub> is vooral een indicator van het mengsel van luchtverontreiniging, dat afkomstig is van uitlaatgassen van het verkeer. Dus niet NO<sub>2</sub> zelf is de belangrijkste veroorzaker van de gezondheidseffecten, maar de componenten die met NO<sub>2</sub> – en dus met wegverkeer – samenhangen.

### 2.3 Blootstelling aan luchtverontreiniging: de rol van groen

In het algemeen geldt dat, hoe meer ruimte er is voor groen in en om een stad, hoe beter dat is voor de luchtkwaliteit, simpelweg omdat er in een groene omgeving (parken, stadsbossen) doorgaans weinig bronnen van luchtverontreiniging aanwezig zijn. De vraag is of de aanwezigheid van lokaal groen de concentraties luchtverontreinigende stoffen in de lucht kan verlagen, doordat de verontreinigingen op de vegetatie worden gedeponeerd of geabsorbeerd. Daarbij wordt onderscheid gemaakt in 1) groen in straten en 2) gebiedsgericht groen.

#### *Ad 1) groen in straten*

De concentratie verontreinigende stoffen in een straat wordt bepaald door de heersende achtergrondconcentratie en de lokale verkeersbijdrage. Voor alle door het verkeer geëmitteerde stoffen en deeltjes geldt dat een lagere doorstroming van de straat tot hogere concentratiebijdragen leidt. Sommige stoffen kunnen op vegetatie deponeren of er door worden opgenomen maar de meeste doen dat niet. Het netto effect van vegetatie langs een weg is dan ook praktisch altijd dat hogere concentratiebijdragen optreden.

#### *Ad 2) gebiedsgericht groen*

Een mogelijke toepassing van vegetatie is om een groter gebied te beplanten en daarmee een significant effect op de buitenluchtconcentraties te verkrijgen. Op zich is dit een terechte redenering. Immers, als één boom een klein effect op de concentraties in de lucht heeft zouden veel bomen bij elkaar een groter effect, wellicht zelfs een significant effect, op de luchtkwaliteit kunnen hebben. Hierbij wordt dus niet direct een bron als wegverkeer aangegrepen maar wordt een algemene verlaging van de (achtergrond)concentratie beoogd. Dat zou een voor de gezondheid nuttige maatregel kunnen zijn, omdat hiermee de blootstelling van de hele populatie afneemt.

Er kan een onderscheid worden gemaakt tussen grootschalige inzet in stedelijk gebied of inzet rondom stedelijk gebied. In beide gevallen zal de vegetatie door

depositie/absorptie een deel van de verontreiniging uit de (aanstromende) lucht kunnen weghalen maar evenzo kan er in beide gevallen een effect op de windsnelheden in het gebied zijn, met mogelijk een negatief effect op de hoogte van lokale concentratiebijdragen. In hoofdstuk 4 worden studies naar inzet van gebiedsgericht groen besproken.

#### *Depositie versus concentratie*

Vaak wordt de geschatte depositie in/op de vegetatie uitgedrukt in vermeden voertuigemissies of in voertuigkilometers. Dit is een potentieel misleidende redenering omdat het suggereert dat de vegetatie direct voertuigemissies reduceert of afvangt terwijl dat nauwelijks of geheel niet het geval is:

- Slechts een klein deel van de voertuigemissies komt in contact met de vegetatie (immers de uitlaatgassen verspreiden zich alle kanten op) en weer slechts een deel daarvan wordt op de vegetatie gedeponneerd of erin opgenomen;
- Daar komt bij dat de verontreinigingen die wel door de bladeren van een boom worden afgevangen slechts voor een deel bestaat uit verontreiniging die door het lokale verkeer is uitgestoten, en voor het overige deel uit verontreiniging afkomstig van andere bronnen (achtergrond).
- Omdat depositie een grotere rol speelt naarmate de deeltjes groter zijn (zie paragraaf 2.3) wordt er naar verwachting maar een klein deel van de gezondheidsschadelijke lokale verkeersuitstoot afgevangen.

De invloed van vegetatie op de luchtkwaliteit moet dan ook niet worden beoordeeld op basis van de geschatte depositie, maar op basis van de concentratie *in de lucht*. Immers, de concentratie in de lucht bepaalt hoeveel verontreiniging er ingeademd wordt. Centraal in dit rapport staat dan ook de vraag in hoeverre de inzet van groen de concentratie verontreinigende stoffen *in de lucht* verlaagt.

Ten slotte: op veel locaties in Nederland worden maatregelen ingezet om de luchtkwaliteit en daarmee de volksgezondheid te verbeteren. Bronmaatregelen (bijvoorbeeld schonere auto's) verdienen de voorkeur boven overdrachtsmaatregelen (bijvoorbeeld afscherming door een geluidsscherm). Maatregelen die zich beperken tot de reductie van NO<sub>2</sub>, door absorptie of filtering, zijn minder efficiënt in termen van gezondheidswinst. Wanneer een dergelijke maatregel op zichzelf staat, kan juist een vertekend beeld ontstaan van de luchtkwaliteit. Door alleen de indicatorstof NO<sub>2</sub> aan te pakken, lijkt de luchtverontreiniging opgelost, terwijl juist de overige verkeersgerelateerde componenten van het mengsel van luchtverontreiniging uit het oog worden verloren. Ook hiermee moet rekening worden gehouden bij het inzetten van vegetatie als maatregel om de luchtkwaliteit langs drukke wegen te verbeteren, nog los van de vraag of dat überhaupt de concentraties wettelijk genormeerde componenten verlaagt.



### 3 Basisinteractie van vegetatie en luchtkwaliteit

In dit hoofdstuk wordt kort stilgestaan bij de basisprocessen die bepalen hoe de aanwezigheid van vegetatie de luchtkwaliteit door opname van gassen of depositie kan beïnvloeden. Het voorliggende rapport is vooral op de stoffen NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub> gericht. Daarom wordt alleen de mogelijke invloed van vegetatie op de concentraties van deze stoffen besproken.

#### 3.1 Gassen<sup>3</sup>

Beplanting of vegetatie neemt (schadelijke) gassen op uit de lucht via de huidmondjes. Huidmondjes zijn kleine holten in de buitenste laag van het blad (Figuur 1). Koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) wordt opgenomen via het huidmondje en verwerkt tot biomassa met water en zonlicht. Daarbij komt zuurstof vrij. Voor de groei is de opname van CO<sub>2</sub> voldoende. Andere gassen zijn niet noodzakelijk voor de beplanting om te kunnen groeien, maar ze treden de huidmondjes wel binnen door concentratieverschillen binnen en buiten het huidmondje (diffusie). Slechts enkele gassen (onder andere NO<sub>2</sub>) worden getransporteerd door de celmembranen en benut voor de groei. Deze gassen hebben een groeibevorderend effect waaraan een maximum zit. Tot een bepaalde concentratie en/of een blootstellingduur neemt de groei toe, daarboven wordt de groei geremd. Wanneer het groeibevorderende effect overgaat in een schadelijk effect verschilt per gewas. Sommige beplanting kan aanzienlijke concentraties ondergaan voordat groeischade optreedt. Dat noemt men tolerante beplanting. Andere beplanting ondervindt schade bij lagere concentraties, waarbij vaak de combinatie van ongunstige factoren, zoals bijvoorbeeld stikstofdioxide (NO<sub>2</sub>) in combinatie met zwaveldioxide, (SO<sub>2</sub>) de beplanting gevoeliger maakt voor schade (Freer Smith, 1984).

<sup>3</sup> De tekst in deze sectie is grotendeels aangeleverd door dr. A. Pronk, PRI, Wageningen.



*Figuur 1* Open en gesloten huidmondjes van 'Crassula ovata' (Dikblad).  
(bron: Radboud Universiteit Nijmegen<sup>4</sup>).

Van de  $\text{NO}_x$  wordt alleen  $\text{NO}_2$  door beplanting via de huidmondjes opgenomen en benut voor de groei. De waslaag van het blad kan slechts zeer geringe hoeveelheden  $\text{NO}_x$  opnemen en de opname van  $\text{NO}$  wordt hier daarom verder niet besproken. Opname treedt alleen op als de huidmondjes bij de juiste hoeveelheid licht, koolstofdioxide en de juiste vochtigheid open staan. Daarnaast moet er vraag zijn naar stikstof. De vraag en daarmee de opname van stikstof door bomen en planten is beperkt en treedt alleen op in het groeiseizoen.

Het vermogen van bomen en struiken om schadelijke gassen op te nemen enerzijds en tolerantie tegen zeer hoge concentraties en/of lange blootstellingsperioden anderzijds, maken een soort geschikt dan wel ongeschikt voor toepassing langs wegen en in straten. Soorten met een groot bladoppervlak met veel huidmondjes nemen meer schadelijke gassen op dan planten met minder huidmondjes. In de beginjaren van luchtkwaliteitonderzoek was het onderzoek vooral gericht op schade aan gewassen door hoge concentraties vervuulende gassen. Recentelijk is daar het aspect van het verbeteren van de luchtkwaliteit aan toegevoegd. Vooral naar de opname van en schade aan bomen en struiken door  $\text{NO}_2$  is veel onderzoek verricht.

<sup>4</sup> <http://www.vcbio.science.ru.nl/image-gallery/show/labels/print/PL0275/>

### 3.2 Processen bij depositie van deeltjes

De snelheid waarmee stofdeeltjes op vegetatie deponeren is sterk afhankelijk van de deeltjesgrootte en wordt ook bepaald door verschillende fysische processen die hierbij een rol spelen. Belangrijk hierbij zijn:

#### Neerslaan van deeltjes

Deeltjes kunnen onder invloed van hun eigen gewicht langzaam naar de aarde zakken en daarbij op een groenelement terecht komen.

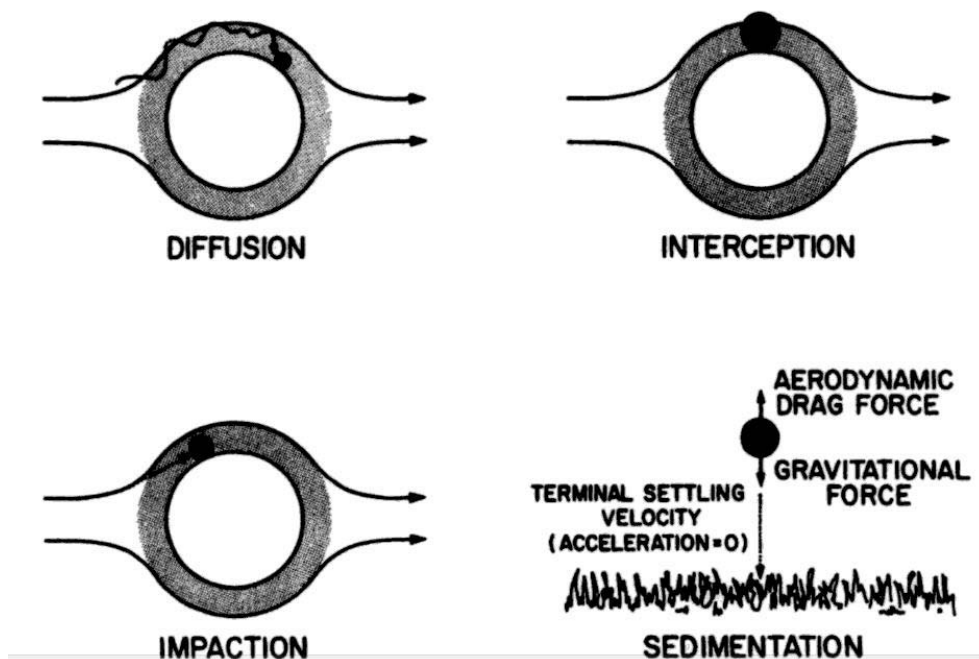
#### Impactatie van deeltjes

Hierbij kan een deeltje dat langs een groenelement (tak, blad of naald) stroomt door zijn eigen traagheid de stroming niet volgen en botst het op het groenelement. Het deeltje vliegt als het ware 'uit de bocht'.

#### Brownsse beweging (diffusie)

Kleine deeltjes volgen de luchtstroming maar botsen hierbij voortdurend en willekeurig op elkaar waardoor er een netto verplaatsing van het deeltje optreedt. Als gevolg kunnen ze tijdens het langsgstromen toch een groenelement raken.

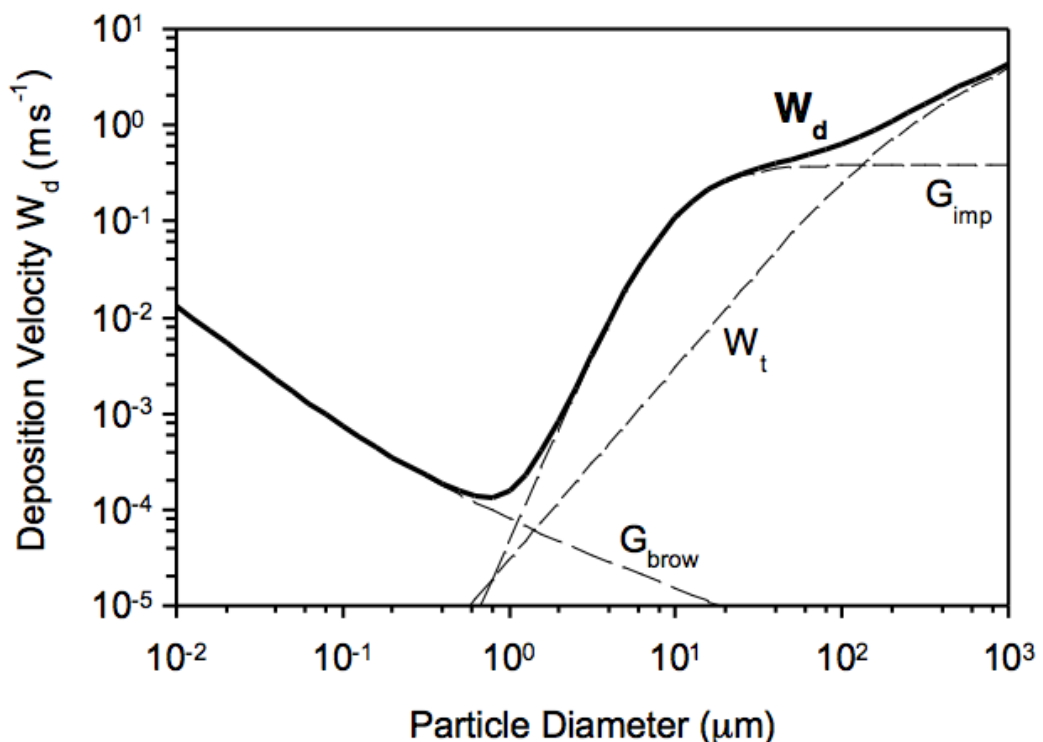
De verschillende processen worden hieronder grafisch weergegeven. Er wordt schematisch getoond hoe stroming, met daarin kleine deeltjes, om een veel groter rond object (een takje of naald) stroomt en hoe het daar vervolgens aan blijft hangen.



Figuur 2 Schematische weergave van de interactie tussen deeltjes, stroming en een obstakel (bron: Davidson en Wu (1989)).

In alle gevallen wordt ervan uitgegaan dat, zodra een deeltje een groenelement raakt, het er in eerste instantie aan blijft kleven. Mogelijk wordt het later door regen weggespoeld, maar dan is het in ieder geval uit de lucht verwijderd. De mate waarin de fysische processen een rol spelen hangt op verschillende manieren van de omstandigheden af. Een belangrijke parameter hierbij is de grootte (diameter) van het deeltje in kwestie. Erg grote deeltjes, met diameters van circa 100  $\mu\text{m}$  of meer, volgen stromingspatronen van lucht nauwelijks en vallen al snel op de grond. Voor deze deeltjes is neerslaan dus het belangrijkste mechanisme. Grote deeltjes, met diameters van circa 50-100  $\mu\text{m}$  of meer, volgen stromingspatronen van lucht betrekkelijk slecht en botsen dus al snel op een obstakel waar de luchtstroming omheen gaat. Voor deze deeltjes is impactatie een dominant mechanisme. De kleinste deeltjes, minder dan 1  $\mu\text{m}$  in diameter, volgen de luchtstroming vrij gemakkelijk. Neerslaan of impactatie is dan ook niet of nauwelijks van belang. Door de Brownse beweging kunnen ze echter ook in contact komen met een groenelement en daar blijven hangen.

In onderstaande figuur is het uiteindelijke verloop van de depositiesnelheid van deeltjes op groenelementen schematisch weergegeven (Raupach, 2000).



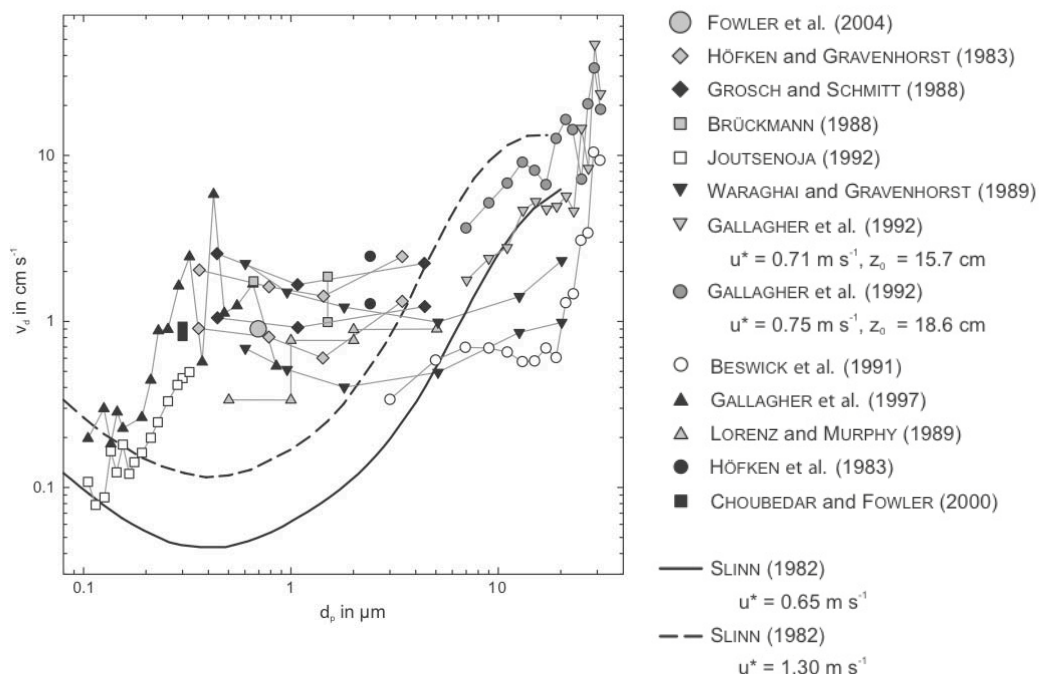
Figuur 3 Schematisch verloop van de depositiesnelheid als functie van de deeltjesgrootte (bron: Raupach (2000)).

De totale depositiesnelheid ( $W_d$ ) is opgebouwd uit de effecten van impactatie ( $G_{\text{imp}}$ ), neerslaan van deeltjes ( $W_t$ ) en voor de allerkleinste deeltjes de Brownse beweging ( $G_{\text{brow}}$ ). Het verloop van de depositiesnelheid als functie van de

deeltjesgrootte is vooral voor de deeltjes groter dan  $1 \mu\text{m}$  redelijk bekend. De mate waarin de depositiesnelheid bij kleinere diameters feitelijk toeneemt, is slechts beperkt bekend. De details van het verloop van de depositiesnelheid zijn ook afhankelijk van het soort gewas. Voor gras is het verloop anders dan voor loofbomen en dat is weer anders dan voor naaldbomen. Het meten van depositiesnelheden is erg lastig, de resultaten worden indirect bepaald en hebben vaak een grote onzekerheid. De specifieke omstandigheden gedurende de metingen kunnen het resultaat ook beïnvloeden waardoor meetresultaten lastig generaliseerbaar en onderling vergelijkbaar zijn.

Bij ultrafijn stof, gedefinieerd als deeltjes met een diameter  $< 0,1 \mu\text{m}$ , speelt dus alleen depositie via Brownse beweging een rol. De totale depositiesnelheid van deze fractie zal daarom lager zijn dan van de grotere deeltjes. Roetdeeltjes die een belangrijke rol lijken te spelen bij het veroorzaken van gezondheidseffecten bevinden zich vooral in deze ultrafijne fractie (Burtscher, 2005).

In Litschke (2008) wordt een overzicht gegeven van gemeten en gemodelleerde depositiesnelheden voor verschillende soorten vegetatie, zie de oorspronkelijke publicatie voor de details.



Figuur 4 Schematisch verloop van de depositiesnelheid in cm/s als functie van de deeltjesgrootte (bron: Litschke (2008)).

Het verloop van de depositiesnelheden is in de praktijk minder vloeiend dan in de schematische weergave van Raupach. Er is een minder diep 'dal' bij diameters van circa  $1 \mu\text{m}$  en evenmin is er een sterke toename van de

depositiesnelheid bij kleinere diameters van de deeltjes, de depositiesnelheden nemen juist af bij steeds lagere diameters.

## 4 Luchtkwaliteit en vegetatie bij een weg

### 4.1 **Stroming, luchtkwaliteit en vegetatie bij een weg**

Voor een goed begrip van de effecten van vegetatie op de luchtkwaliteit langs een weg of in een straat is het nodig om eerst stil te staan bij de wijze waarop verontreiniging zich langs een weg gedraagt. Vervolgens kan dan worden nagegaan hoe de verspreiding van verontreiniging verandert als er vegetatie langs een weg of in een straat wordt geplaatst.

De concentraties in een straat of langs een weg worden hoofdzakelijk bepaald door slechts enkele kenmerken:

- de omvang van de emissies, die wordt bepaald door de verkeersintensiteit, de samenstelling en de rijsnelheid;
- de locatie van de emissies;
- de hoeveelheid lucht die door de straat of langs de weg waait, de verdunning van de emissies met schone lucht.

Voor inzicht in de wijze waarop de emissies van het verkeer worden verdund is het handig om twee situaties te onderscheiden: verkeer op een min of meer vrij liggende weg en verkeer in een straat tussen bebouwing, de zogenoemde street canyon.



De verschillende situaties in een straat kunnen schematisch worden geanalyseerd. Hieronder staan enkele voorbeelden:



Figuur 5 Kale street canyon (bron: Google Earth).



Figuur 6 Brede street canyon met bomen langs de hoofdrijbaan (bron: Google Earth).



Figuur 7 Geheel vrij liggende snelweg (bron: RIVM).



Figuur 8 Door smalle bossages omgeven snelweg (bron: Google Earth).

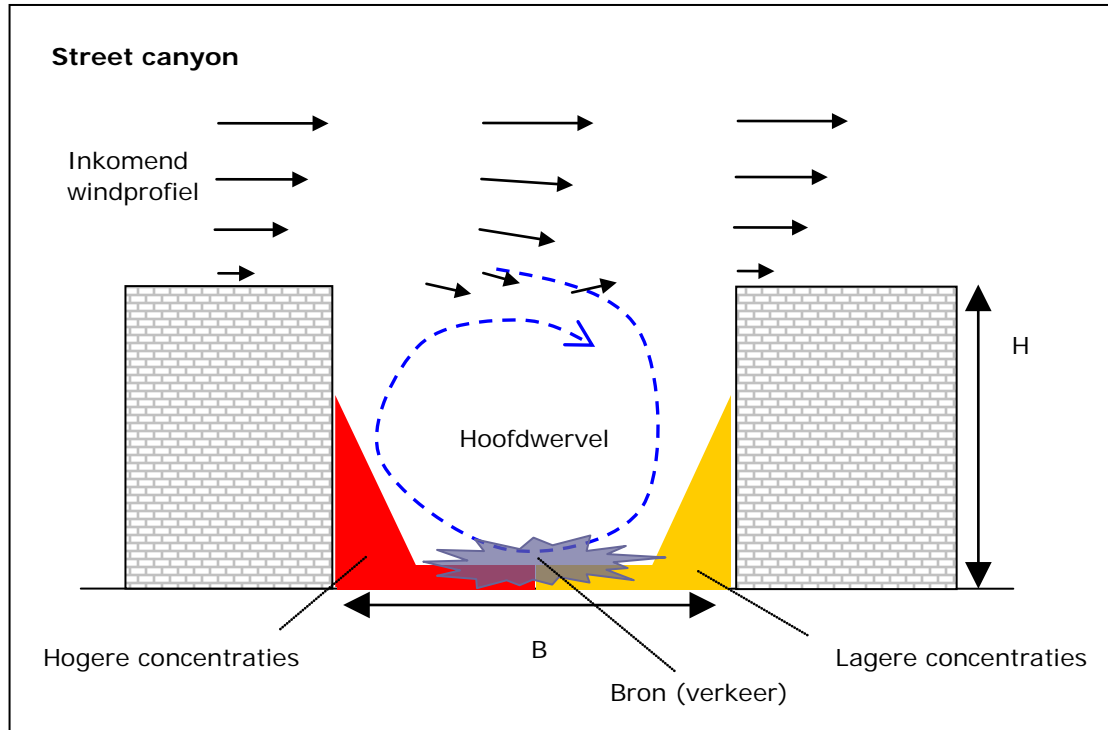




*Figuur 9 Door bomen omgeven brede stedelijke invalsweg (bron: RIVM).*

#### **4.2 De street canyon zonder bomen**

In de situatie van een street canyon ontstaat bij windstroming, die dwars op de bebouwing staat, een luchtwerveling tussen de gebouwen.



Figuur 10 Schematisch stromingspatroon in een street canyon.

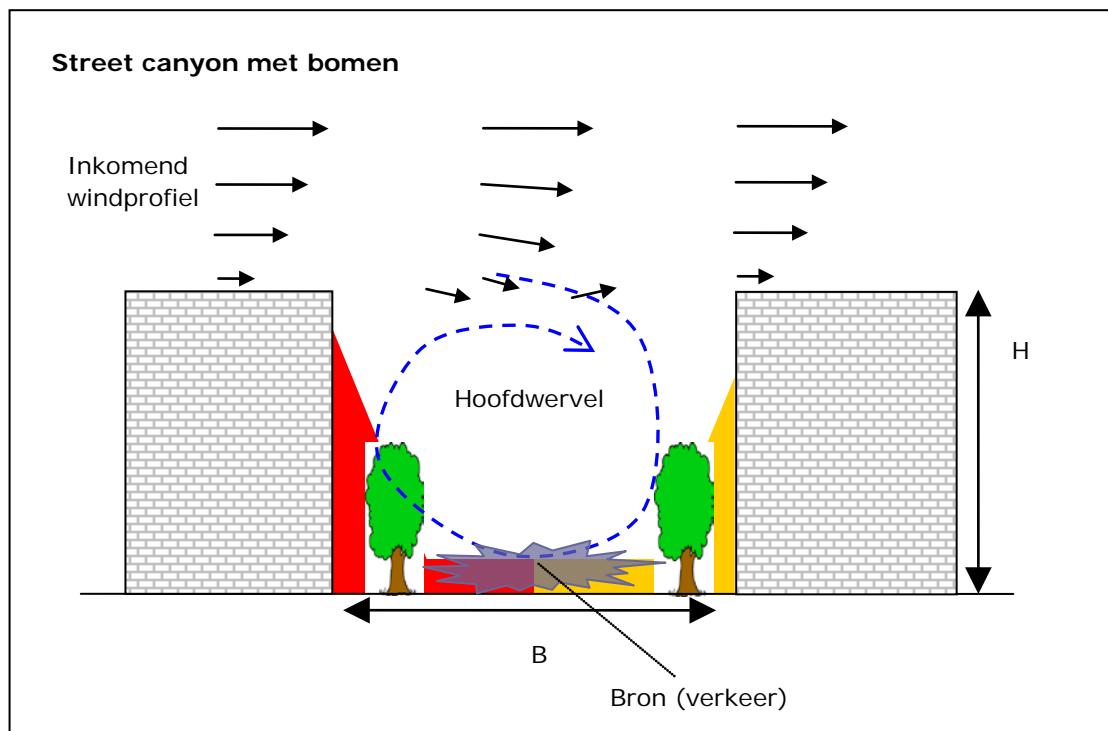
Wegverkeer in een straat produceert emissies, die door de bewegingen van het verkeer zelf een beetje worden verdeeld tot een wolk van emissies. Op de weg zijn de concentraties het hoogst. De luchtwerveling verdeelt de emissies van het verkeer een beetje door de straat, waarbij de hoogste concentraties aan die kant van de straat ontstaan waar de wind de verontreiniging heen voert (links in de figuur). Aan de bovenkant van de straat vindt uitwisseling tussen de lucht in de straat en de langsstromende lucht plaats. Naarmate er meer wind is neemt de uitwisseling van lucht toe en neemt ook de verdunning in de straat toe met lagere concentraties tot gevolg.

Als de wind niet dwars op de straat staat, maar schuin op de lengte van de straat staat, ontstaan twee stromingspatronen: de werveling zoals hierboven geschetst treedt nog steeds op maar nu stroomt de lucht ook in de lengte door de straat. De lucht stroomt dan niet in cirkels op één plek, maar stroomt in een kurkentrekkerbeweging door de straat. Voor de analyse van de verdunning maakt dat echter nauwelijks uit. In de omgeving van kruisingen ontstaan er meer complexe stromingspatronen. Ook daarvoor geldt echter dat de concentraties langs de weg en op de straathoeken grofweg schalen met de windsnelheid: meer wind betekent betere verdunning en doorstroming en dus ook lagere concentraties.

Dit relatief simpele beeld van de situatie in een street canyon is in vele experimenten, in het veld en in windtunnels bevestigd (Kovar-Panskus, 2002 en Eliassona, 2006).

### 4.3 De street canyon met bomen

In veel straten in Nederland staan bomen, soms aan een kant van de straat, soms aan beide kanten en soms ook nog in het midden van de straat, in de middenberm. Een schematische situatie is in onderstaande Figuur 11 gegeven.



Figuur 11 Schematisch stromingspatroon in een street canyon met bomen.

Als de stroming in een street canyon door de plaatsing van bomen in de straat wordt beïnvloed treden er twee effecten op. Aan een kant is er een zekere mate van depositie van fijn stof in de vegetatie en aan de andere kant belemmert de vegetatie de luchtstroming en verdunning. Het eerste effect leidt tot iets lagere concentraties in de straat terwijl het tweede effect tot hogere concentraties in de straat leidt. Belemmering van stroming leidt altijd tot minder verversing en dus tot hogere concentraties, ongeacht wat de reden van de belemmering is. Om in een situatie met vegetatie in een straat netto lagere concentraties te verkrijgen dan zonder vegetatie is het dus nodig dat de vegetatie aanzienlijke hoeveelheden fijn stof afvangt.

De negatieve effecten van vegetatie op de stroming en de concentraties zijn goed bekend. Een schatting kan worden gemaakt van de depositie die in de vegetatie nodig is om deze negatieve effecten te compenseren. Stel dat de vegetatie tot een concentratiebijdrage van de weg leidt die 25% hoger is dan zonder vegetatie het geval zou zijn. Om dit te compenseren moet de vegetatie dus 20% van de bron afvangen (NB.  $1.25 * 0.80 = 1.00$ ). Als nu de bronsterkte gelijk is aan  $Q$  kilogram fijn-stof per kilometer weg per jaar moet de vegetatie dus  $0.20 * Q$  afvangen. Uitgaande van een gemiddelde afvangst per boom van  $0.1$  kg per jaar zijn er dus  $N = 0.20 * Q / 0.1$  bomen per kilometer nodig om de negatieve effecten te compenseren. Voor een straat met 15.000 voertuigen per etmaal, waarvan 2% middelzwaar en 2% zwaar vrachtverkeer, leidt dit ertoe dat er aan weerszijden elke 3-4 meter een boom moet staan om theoretisch de hogere concentraties ten gevolge van de bomen te compenseren. Dit leidt echter tot grotere problemen want als de bomen zo dicht op elkaar staan is de verhoging van de verkeersbijdrage nog hoger dan de aangenomen 25%.

In bovenstaande voorbeeldberekening is nog voorbijgegaan aan het feit dat een afvangstpercentage van 20% van de bronemissie al een bijzonder (en onwaarschijnlijk) hoog percentage is omdat 1) slechts een klein gedeelte van de luchtstroom met de bladeren in aanraking zal komen en 2) slechts een klein gedeelte van het stof uit die lucht door de bladeren zal worden afgevangen. Ook wordt voorbijgegaan aan het feit dat het onbekend is wat de herkomst is van het stof dat wel door de bladeren wordt afgevangen. Dit is niet alleen stof afkomstig van het lokale wegverkeer, maar ook stof van andere herkomst (stedelijke achtergrond).

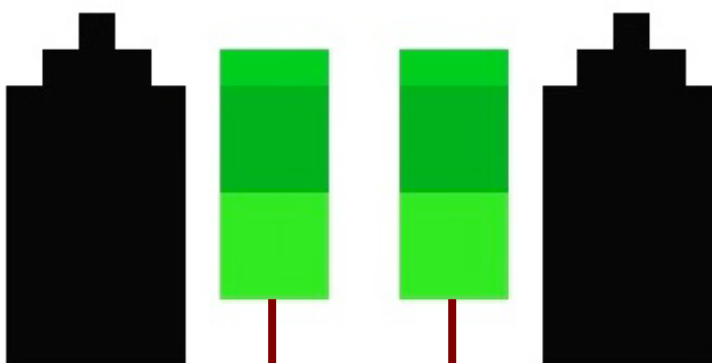
In Litschke (2008) wordt met een andere redenering een soortgelijke vergelijking gemaakt tussen de emissies in een straat en de maximale depositie van vegetatie rond die straat. Bij de vergelijking wordt ervan uitgegaan dat een combinatie van bomen en struiken tot maximaal  $8000 \text{ m}^2$  werkzaam bladoppervlak per 100 meter straat kan leiden. Gebruik van Nederlandse emissiefactoren voor  $\text{PM}_{10}$  in 2009 geeft bij 25.000 voertuigen per dag (2.5% middelzwaar en 2.5% zwaar vrachtverkeer), in een redelijk drukke straat, een emissie van  $2 \text{ mg}/100 \text{ m}/\text{seconde}$ . In de redenering van Litschke is onder deze omstandigheden, indien alle lucht met de verkeersemisies door de vegetatie heen gaat, een depositiesnelheid van circa  $1 \text{ centimeter}/\text{seconde}$  nodig om alle verkeersemisies op de vegetatie te laten deponeren. Litschke vermeldt hier bij dat de negatieve effecten van de vegetatie op de stroming in de beschouwing niet in rekening zijn gebracht. Gegeven de situatie die ontstaat met een tunnel van vegetatie is duidelijk dat de lucht maar beperkt door de vegetatie zal stromen en de berekende depositie in de praktijk geheel niet realistisch is.

Samengevat, het is nauwelijks mogelijk tot praktisch onmogelijk om zoveel bomen in een street canyon aan te planten dat de positieve effecten de negatieve effecten compenseren.

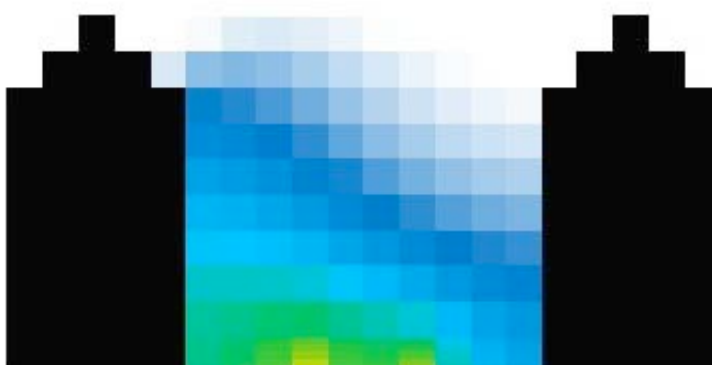
Het vrij beschikbare rekenpakket voor Computational Fluid Dynamics (CFD), ENVI-met, bevat als voorbeeldberekeningen een street canyon die is gevuld met grote bomen. Het voorbeeld is met ENVI-met, versie 3.1, doorgerekend en de resultaten zijn vergeleken met die van een berekening zonder bomen in de straat. In alle voorbeelden is met de standaardinstellingen van ENVI-met gerekend en ook met de standaard planteigenschappen. ENVI-met rekent dan zelf uit hoe groot de depositiesnelheid van het stof op de vegetatie is. Het doel van de voorbeelden is niet om gedetailleerde effecten te bepalen of te optimaliseren maar om de belangrijkste mechanismen te illustreren. In een volgend hoofdstuk zullen gedetailleerde resultaten van experimenten en berekeningen worden beschreven.

De straat is 20 meter breed en de huizen aan de weg zijn 16 meter hoog. Voor het verkeer zijn er twee lijnbronnen van  $PM_{10}$  gemodelleerd. Alle instellingen van de twee berekeningen zijn identiek, afgezien van de aanwezigheid van de bomen. De configuratie en de resultaten worden in Figuur 12-Figuur 14 getoond. De kleurschaal voor de concentraties is in beide resultaten identiek. De rode kleuren geven de hoogste concentraties weer.

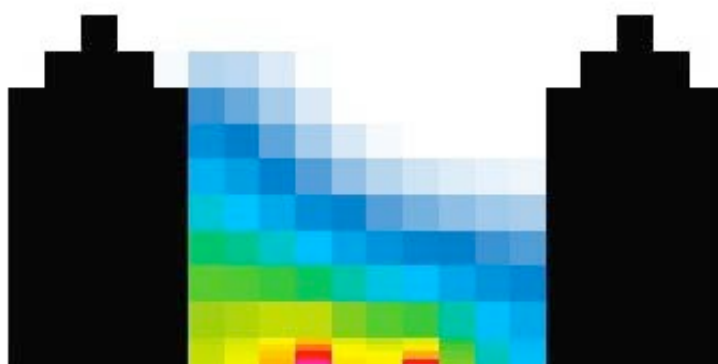




Figuur 12 Configuratie voor de berekening met bomen in de straat.



Figuur 13 Resultaat van de berekening zonder bomen in de straat. Elk vakje correspondeert met een rekencel en heeft een afmeting van 2x2x2 meter.

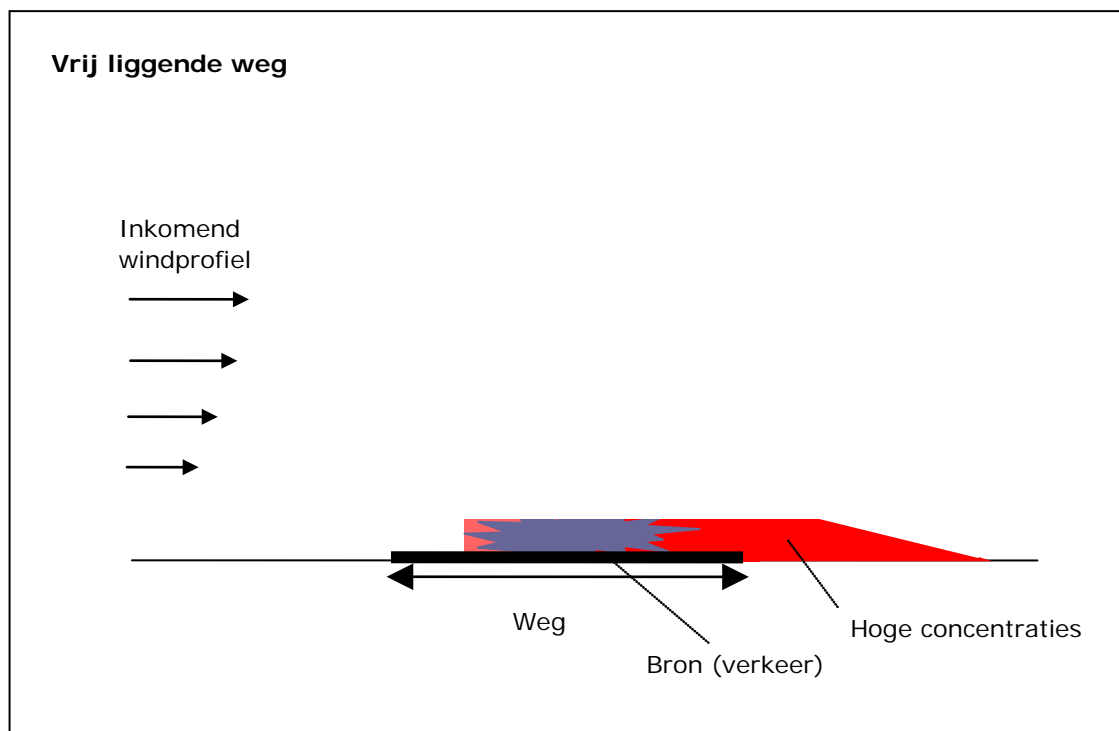


Figuur 14 Resultaat van de berekening met bomen in de straat.

Uit de figuren is direct duidelijk dat de berekende concentraties in de situatie met bomen in de straat aanzienlijk hoger zijn dan in de situatie zonder bomen. In hoofdstuk 6 wordt getoond dat de toename voor  $PM_{2,5}$  deeltjes ten gevolge van bomen in de straat nog groter is dan voor  $PM_{10}$  het geval is.

#### 4.4 Een vrij liggende weg

In geval van een vrij liggende weg is de situatie heel anders dan in een straat canyon. Schematisch is de situatie in Figuur 15 aangegeven.



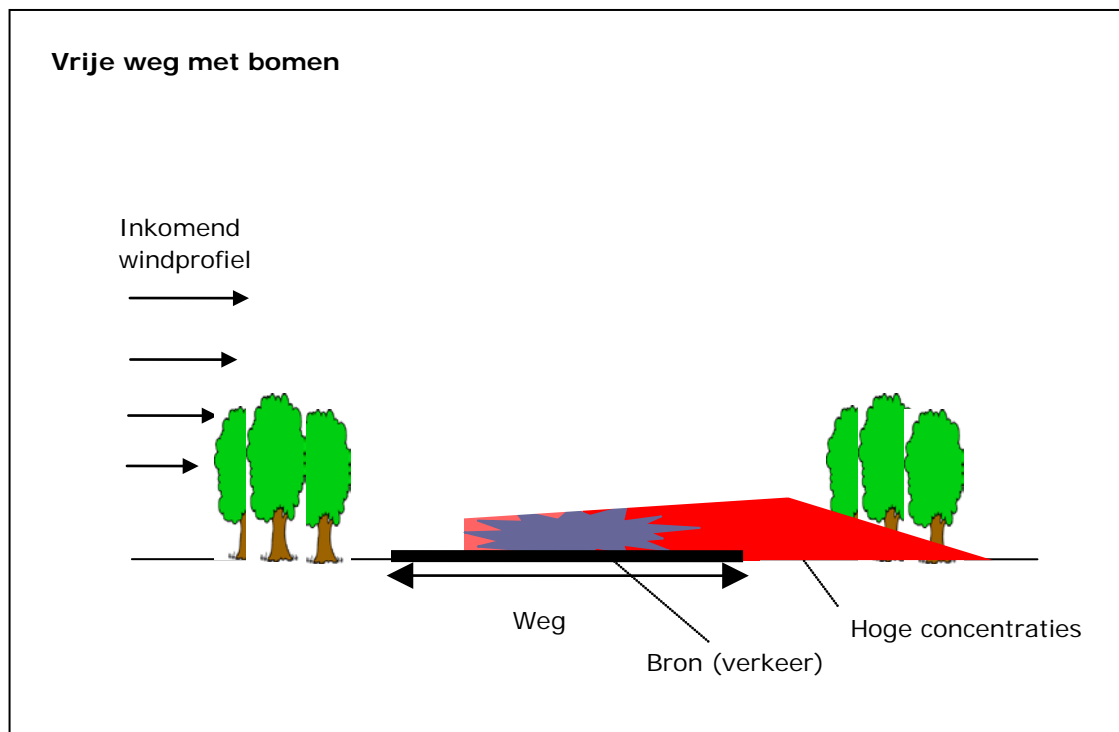
Figuur 15 Schematisch stromingspatroon bij een vrij liggende weg.

Net als in de situatie van de straat canyon mengt het rijdende verkeer de emissies een beetje, waardoor er een wolk van verontreiniging op de weg komt te liggen. De wind komt ook in dit voorbeeld van de linkerkant van de figuur. Door het ontbreken van bebouwing langs de weg, is er geen werveling. De lucht stroomt vlak over de weg en voert de verontreiniging weg. Op en boven de weg zijn de concentraties het hoogst en ze nemen af met toenemende afstand tot de weg. Aan de kant stroomopwaarts van de weg komen geen concentratiebijdragen van het verkeer voor.

Bij een vrij liggende (snel)weg geldt ook dat de concentraties sterk afhangen van de verdunning, dus van de windsnelheid. Hoe groter de windsnelheid, hoe groter de verdunning en hoe lager de concentraties.

#### 4.5 Vrij liggende weg met bomen en/of vegetatie

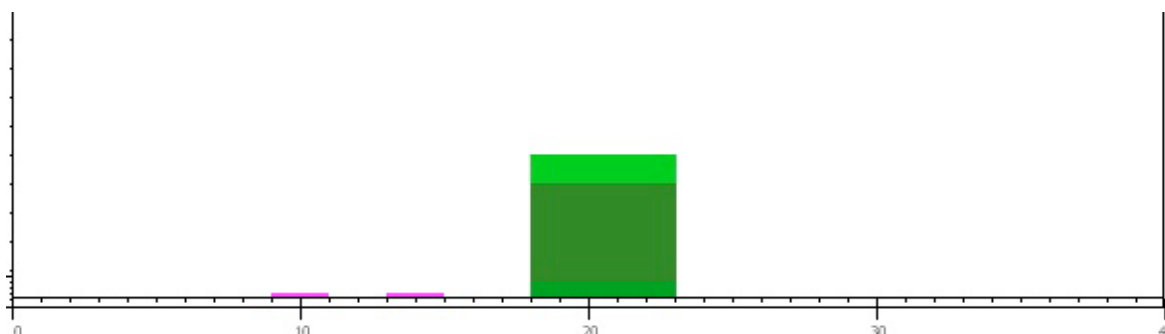
Een simpele situatie met vegetatie langs de weg is in Figuur 16 geschetst. Twee situaties kunnen worden onderscheiden, één- of tweezijdige vegetatie.



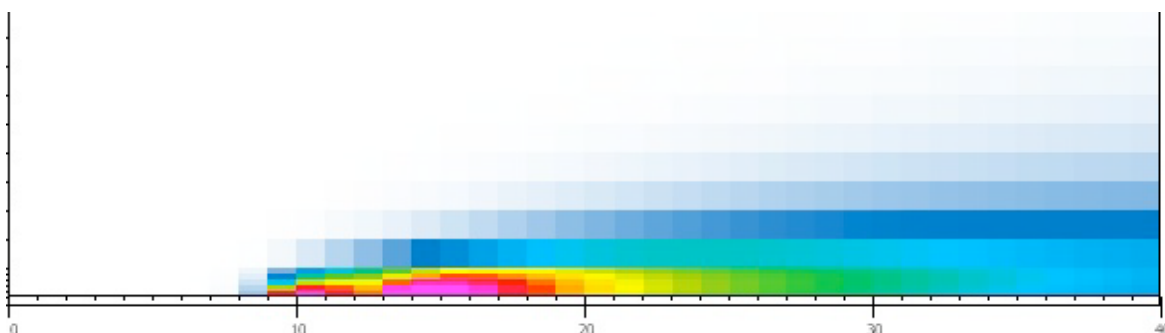
*Figuur 16 Schematisch stromingspatroon bij een vrij liggende weg met bomen.*

De vegetatie remt weer de windsnelheid boven en direct naast de weg. De hoeveelheid emissies is uiteraard onafhankelijk van de vegetatie, waardoor dezelfde emissies met minder lucht worden gemengd. Het gevolg is dat de concentraties op en naast de weg iets hoger worden dan zonder vegetatie het geval is.

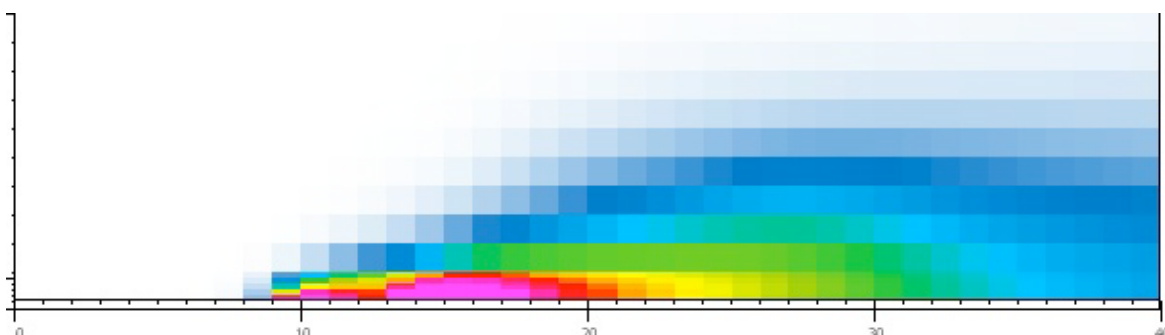
Ook voor de vrij liggende weg, met en zonder vegetatie aan de zijkant, zijn berekeningen aan  $PM_{10}$  met ENVI-met, versie 3.1, uitgevoerd. De wind komt van links in de figuur, loodrecht op de weg. Op 10 en 14 meter van de linkerzijde zijn twee lijnbronnen van  $PM_{10}$  aangebracht. De 10 meter hoge vegetatie begint 6 meter rechts van de rechter lijnbron. Deze situatie komt in Nederland geregeld voor. De resultaten zijn in Figuur 17-Figuur 19 weergegeven. Net als eerder zijn, afgezien van de aanwezigheid van vegetatie, alle kenmerken van de situaties gelijk. Ook de kleurschaal voor de concentratie is in alle figuren identiek.



*Figuur 17 Configuratie voor de berekening met bomen langs een vrij liggende (snel)weg. Het groene blok geeft de locatie van de groenstrook aan, met daarin bomen van 10 meter hoog. De beide strepen bij 9-11 en 13-15 geven de gebruikte locaties van de verkeersemmissies weer.*



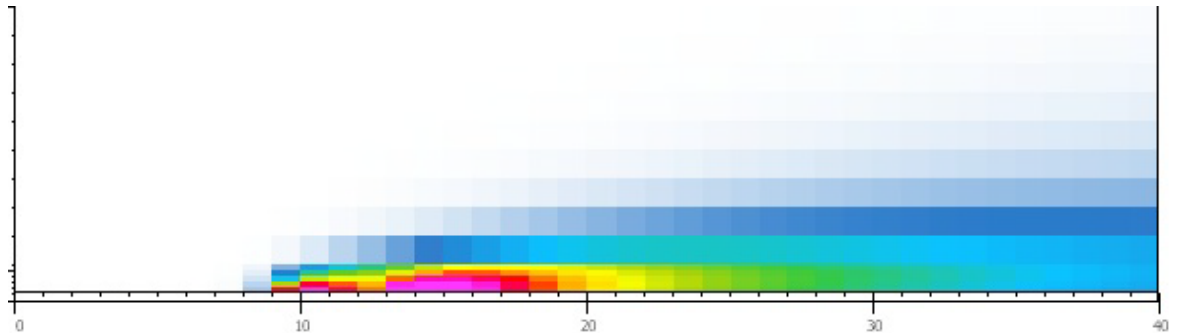
*Figuur 18 Resultaat van de berekening zonder bomen langs de weg.*



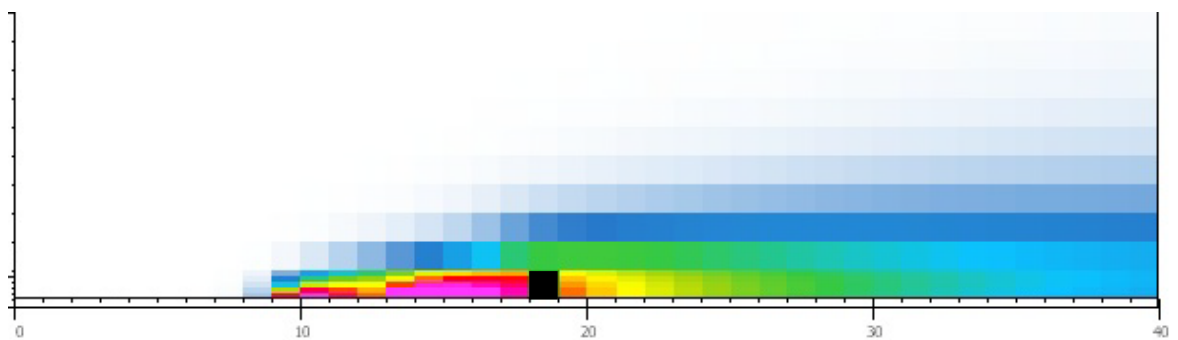
*Figuur 19 Resultaat van de berekening met bomen langs de weg.*

In plaats van hogere bomen kunnen ook één of enkele sets van minder hoge vegetatie langs een weg worden gezet. Voor deze situatie zijn ook berekeningen aan  $PM_{10}$  met ENVI-met, versie 3.1, uitgevoerd. De wind komt wederom van links in de figuur, loodrecht op de weg. Op 10 en 14 meter van de linkerkzijde

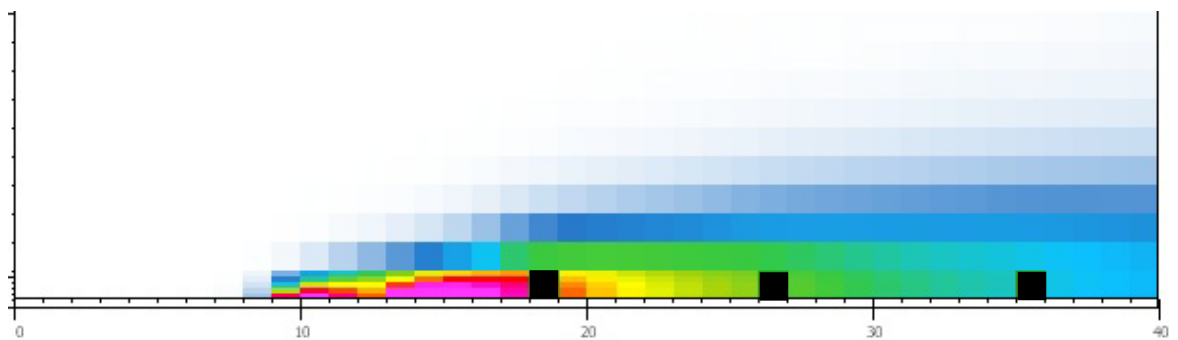
zijn twee lijnbronnen van PM<sub>10</sub> aangebracht. De 2 meter hoge vegetatie begint iets rechts van de rechter lijnbron. De resultaten zijn in Figuur 20-Figuur 22 weergegeven. Net als eerder zijn, afgezien van de aanwezigheid van vegetatie, alle kenmerken van de situaties gelijk. Ook de kleurschaal voor de concentratie is in alle figuren weer identiek.



Figuur 20 Resultaat van de berekening zonder vegetatie langs de weg.



Figuur 21 Resultaat van de berekening aan één groepje vegetatie langs de weg. Het zwarte blokje tussen 18 en 19 meter is een kleine haag die langs de weg staat.



Figuur 22 Resultaat van een berekening aan drie groepjes vegetatie langs de weg. In deze berekening staan er ook hagen (de zwarte blokjes) op 26 meter en op 35 meter op de schaal.

De vegetatie zorgt ook in dit geval voor opstuwung van de luchtstroming en demping van de windsnelheid. Kort achter het eerste vegetatie-element zijn de concentraties hoger dan zonder vegetatie het geval is. De groepjes vegetatie die

op grotere afstand van de weg staan, hebben weinig en steeds minder invloed op de luchtkwaliteit.

#### **4.6 Samenvatting**

Samenvattend kan worden gesteld dat de luchtkwaliteit in een straat of langs een weg onder andere door twee belangrijke aspecten wordt bepaald: de hoeveelheid emissies van het verkeer en de hoeveelheid langsstromende lucht waarmee deze emissies worden verdund.

Indien de hoeveelheid langs een weg of door een straat stromende lucht op de een of andere manier wordt belemmerd dan nemen de concentratiebijdragen van het verkeer in de directe omgeving toe, en de totale concentraties dus ook.

Omdat vegetatie in of langs een straat of weg praktisch altijd tot een belemmering van de stroming leidt is het dus onontkoombaar dat de concentraties omhoog gaan. De enige manier om de concentraties toch te verlagen is als de vegetatie door depositie zoveel verontreiniging bindt dat de negatieve effecten van de vegetatie op de stroming meer dan gecompenseerd worden.

Op basis van de beschikbare informatie voor depositie op stadsbomen is het nauwelijks mogelijk tot praktisch onmogelijk om zoveel bomen in een street canyon aan te planten dat de positieve effecten de negatieve effecten compenseren. In hoeverre bomen langs wegen in staat zijn om een netto positief effect op de luchtkwaliteit te hebben is uitgebreid onderzocht. De resultaten worden in hoofdstuk 6 gepresenteerd.

## 5 Gebiedsgerichte inzet van vegetatie

### 5.1 Gebiedsgerichte studies

In de Verenigde Staten van Amerika worden al enkele tientallen jaren door de 'US Forest Service' van de United States Department of Agriculture (USDA) studies aan de effecten van grootschalige inzet van vegetatie verricht. Voor een aantal steden en gebieden is een systematische analyse gemaakt van de effecten van het 'Urban Forest'. Volgens deze studies beïnvloeden bomen in stedelijk gebied de luchtkwaliteit op vier verschillende manieren:

- reductie van temperatuur en bijkomende microklimaat-effecten;
- verwijdering van luchtverontreiniging;
- emissie van vluchtige organische stoffen en emissies ten gevolge van het onderhoud van de bomen;
- als bijkomend effect energiebesparing in gebouwen en als gevolg afnemende emissies voor stroomopwekking.

Los hiervan is er nog een effect door de opslag/vastlegging van koolstofdioxide.

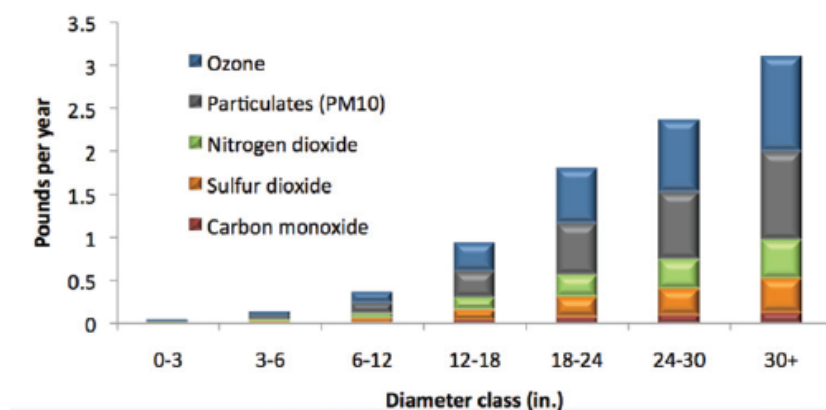
Hieronder wordt een aantal studies besproken waarin de effecten van grootschalige inzet van vegetatie op luchtkwaliteit zijn geschat.

Voor de regio rond de stad New York zijn de bomen in kaart gebracht en met behulp van het programma UFORE (REF) zijn de effecten op de luchtkwaliteit in het gebied geschat. De relatieve effecten (concentratie-afname), gedurende een dag in het seizoen dat de bomen blad dragen zijn als volgt voor verschillende stoffen: O<sub>3</sub> 0.50%, PM<sub>10</sub> 0.47%, SO<sub>2</sub> 0.48%, NO<sub>2</sub> 0.31% en CO 0.002%. Als de vegetatie het gehele jaar groen is, dan is het effect op de luchtkwaliteit dus kleiner dan 0.5%. Omdat veel vegetatie een deel van het jaar geen blad draagt zal het effect gemiddeld over een jaar kleiner zijn dan 0.5%. Voor andere steden in de Verenigde Staten zijn gelijksoortige effecten gerapporteerd. Op de website<sup>5</sup> van de Forest Service is bij de literatuur van Nowak een lijst van steden en gebieden te vinden waar studies met UFORE zijn gedaan. De effecten van vegetatie op de luchtkwaliteit worden in sommige studies doorvertaald naar economische gevolgen, ze worden uitgedrukt in financiële winsten en verliezen. Waar de UFORE-berekeningen al een aanzienlijke onzekerheid kennen, wordt die bij de omrekening naar geld nog eens groter.

Door Nowak en Heisler (2010) is recent een studie naar de effecten van stedelijke bomen en parken in de Verenigde Staten uitgevoerd. Hierbij is, afgezien van luchtkwaliteit, ook naar de effecten op de gemiddelde temperatuur,

<sup>5</sup> <http://nrs.fs.fed.us/people/dnowak>

de effecten in de hoeveelheid ultraviolette straling en de koolstofdioxide-huishouding gekeken. De lokale effecten van vegetatie op het windklimaat en de bijbehorende concentratie-effecten worden door Nowak niet besproken. Voor de stad Chicago is onderstaande verdeling van jaarlijkse depositie<sup>6</sup> per boom per grootteklasse geschat.



**Figure 20. Estimated pollution removal by individual trees by diameter class in Chicago, Illinois<sup>42</sup>**

*Figuur 23 Geschatte vangst van PM<sub>10</sub> per jaar per individuele boom voor bomen met verschillende groottes.*

Bomen met een gemiddelde stamdiameter van 30-45 centimeter vangen volgens deze schatting in de orde van 140 gram PM<sub>10</sub> per jaar.

De volgende aanbevelingen worden onder andere door Nowak gedaan voor de optimalisatie van het effect van de vegetatie op de luchtkwaliteit (in de gemiddelde Amerikaanse situatie):

- vergroot het aantal gezonde bomen;
- gebruik zo veel mogelijk bomen met lage VOC-emissies;
- streef naar grote gezonde bomen, met het grootste effect per boom;
- gebruik zo veel mogelijk jaargroene bomen;
- gebruik geen bomen die gevoelig zijn voor verontreiniging;
- gebruik zo veel mogelijk langlevende en onderhoudsarme bomen (voorkom emissies bij planten en verwijderen en onderhoud);
- voorkom emissies bij het onderhoud van de bomen;
- plant bomen om schaduw voor personen, voertuigen en gebouwen te geven;
- zorg voor voldoende water voor de bomen.

<sup>6</sup> 1 Pound komt overeen met 450 gram. Een inch komt overeen met ruim 2,5 centimeter.



Vegetatie wordt in de Verenigde Staten ook regelmatig ingezet om het zogenaamde 'hitte-eiland'-effect te verminderen door schaduw te genereren voor gebouwen en voertuigen. Op de site van de Amerikaanse milieudienst, de Environmental Protection Agency (EPA), wordt uitgebreid aandacht besteed aan dit effect, zie de site <http://www.epa.gov/heatisld/>. Als bijproduct van de inzet van vegetatie tegen het hitte-eiland effect wordt ook regelmatig stilgestaan bij de effecten van de vegetatie op andere milieugebieden, zoals luchtkwaliteit. Dit kan zowel via de invloed van bomen en struiken gaan als via de invloed van groene daken voor koeling, zie de genoemde site van de EPA.

In (Tiwary, 2009) is een combinatie van de modellen ADMS-urban en UFORE gebruikt om de effecten van 357 hectare vegetatie in een gebied van 10 x 10 kilometer in Londen te modelleren. Hierbij is voor verschillende scenario's<sup>7</sup> om meer vegetatie te planten de hoeveelheid extra depositie van PM<sub>10</sub> geschat. In geval van een scenario van de aanplant van 75% gras, 20% *A. pseudoplatanus* (gewone esdoorn) en 5% *P. menziesii* (Douglasspar) wordt een gemiddelde PM<sub>10</sub>-depositie van circa 9 kilogram per jaar per hectare berekend. De depositie is niet uniform over het studiegebied verdeeld maar is groot waar de vegetatie is gelegen en lager op andere locaties. Tiwary schat dat deze afname resulteert in een effect op de bevolking van het voorkomen van tweemaal vroegtijdig overlijden en twee ziekenhuisopnames voor luchtwegproblemen.<sup>8</sup> In de studie wordt genoemd dat de onzekerheden hierin groot zijn, maar ze worden niet uitgewerkt.

Door Bealey (2007) is uitgerekend wat de geschatte effecten op PM<sub>10</sub>-concentraties zijn als open ruimte in verschillende gebieden wordt opgevuld met vegetatie. De berekening is gedaan voor Wolverhampton City en voor Glasgow City. Met behulp van GIS-informatie is voor beide gebieden de beschikbare ruimte bepaald. De PM<sub>10</sub>-concentraties zijn met het FRAME-model berekend. Bij het opvullen van de open ruimtes doet zich het probleem voor dat de hoogste PM<sub>10</sub>-concentraties voorkomen in de gebieden met de minste beschikbare ruimte. Als gevolg is het praktische effect van opvullen beperkt. Reducties in concentratie van 2.5% (Glasgow) tot 7% (Wolverhampton) lijken haalbaar als 25% van de beschikbare ruimtes met vegetatie worden opgevuld.

Door de universiteit van Lancaster zijn onder leiding van professor Nick Hewitt verschillende studies verricht naar de effecten van de inzet van vegetatie in grotere gebieden zoals de 'West Midlands' in Engeland. In een bijdrage aan een

<sup>7</sup> De scenario's betreffen 1. 100% gras; 2. 50% gras, 50% *A. pseudoplatanus*; 3. 100% *A. pseudoplatanus*; 4. 75% gras, 20% *A. pseudoplatanus*, 5% *P. menziesii*; 5. 100% *P. menziesii*. Met  $V_g$  *pseudoplatanus*=0.00119 m/s en  $V_g$  *menziesii*=0.00297 m/s.

<sup>8</sup> Er wordt niet vermeld hoeveel personen in het studiegebied wonen.

conferentie is Antwerpen (VITO, 2010) zijn de studies en resultaten samengevat. Voor het gebied van de West Midlands, met een grootte van circa 900 km<sup>2</sup>, wordt een afname van de PM<sub>10</sub>-concentratie van circa 10% geschat indien een kwart van de daarvoor beschikbare open ruimte in dat gebied met bomen wordt gevuld. De universiteit heeft ook een brochure<sup>9</sup> hierover uitgegeven. In de brochure wordt, onder andere, een overzicht gegeven van boomsoorten die meer of minder geschikt zijn om fijn stof af te vangen. Navraag bij professor Hewitt tijdens de conferentie leerde dat er van gemiddelde depositiesnelheden wordt uitgegaan en dat de onzekerheden in de berekeningen aanzienlijk maar niet gespecificeerd zijn. De zeer lokale effecten van vegetatie op de luchtkwaliteit, zoals de afname van de windsnelheid en daarmee samengaan hogere lokale verkeersbijdragen, zijn niet meegenomen in de berekeningen. De spreiding in resultaten die verschillende studies naar de effecten van gebiedsgerichte inzet van vegetatie geven is een maat voor de onzekerheden die hierbij optreden.

## 5.2 Kleine gebieden

In opdracht van het CROW heeft het VITO in 2010 en 2011 met ENVI-met berekeningen uitgevoerd aan de effecten van bomenrijen in een typische Nederlandse brede street canyon (De Maerschalck, 2011). Een van de doorgerekende situaties betrof die van een straat met een dubbele rij bomen maar zonder verkeer in de straat. In die situatie treedt nog steeds depositie van fijn stof op waardoor de heersende achtergrondconcentratie iets kan afnemen. De berekeningen zijn voor twee depositiesnelheden uitgevoerd, gemiddelde depositie zoals die standaard in het ENVI-met model is ingebouwd en sterk verhoogde depositie. De berekende totale depositie op een gemiddelde boom in een jaar tijd is vergeleken met gemeten waarden om te bepalen welke depositiesnelheid het best bij de metingen aansluit. De beste overeenkomst blijkt op te treden bij een depositiesnelheid van ruim 2.5 maal de laagste depositiesnelheid maar nog steeds een factor 9 lager dan de hoogste depositiesnelheid. In de situatie van de verkeersloze straat leidde de depositie, gemiddeld over alle windrichtingen, op de trottoirs tot een afname van de achtergrondconcentratie met 0.2% op een achtergrondconcentratie van 25 µg/m<sup>3</sup>. Dit effect is naar verwachting representatief voor wat met een lokale inzet van bomen in een emissielooos gebied kan worden bereikt.

Voor de NO<sub>2</sub>-concentratie in een verkeersloze straat met bomen merkt VITO in de rapportage op dat door het schaduw effect van de bomen er een lichte verschuiving in het chemisch evenwicht tussen ozon, NO en NO<sub>2</sub> is hetgeen tot een lokale verhoging van enkele procenten leidt. Het effect is weliswaar klein,

<sup>9</sup> [www.es.lanacs.ac.uk/people/cnh/UrbanTreesBrochure.pdf](http://www.es.lanacs.ac.uk/people/cnh/UrbanTreesBrochure.pdf)

maar toch voldoende om een mogelijk positief effect ten gevolge van de opname van NO<sub>2</sub> door de vegetatie teniet te doen. De NO<sub>2</sub>-concentraties in de straat vallen uiteindelijk 1-3% hoger uit dan zonder de bomen.

### 5.3 Groene daken

Een andere toepassing van vegetatie betreft de zogenaamde groene daken. In Nederland is voor zover ons bekend geen onderzoek uitgevoerd waarbij het effect op de concentratie is gekwantificeerd. In een recente Amerikaanse studie is het effect van groene daken op de luchtkwaliteit in Chicago geschat op basis van schattingen van de droge depositie (Yang, 2011). Het totale oppervlak aan 'groen dak' is geschat met behulp van luchtfoto's. De effectiviteit van de vegetatie is uitgedrukt in kilogram per hectare per jaar en kan niet worden vertaald naar concentratie. De auteurs concluderen dat toepassing van groene daken mogelijk een interessante aanvullende maatregel zou kunnen zijn om de luchtkwaliteit in steden te verbeteren (Yang, 2011). Bij gebrek aan andere wetenschappelijke artikelen over dit onderwerp vergelijken Yang et al. hun resultaten met depositieschattingen die in 'grijze literatuur' zijn gepubliceerd.

In het algemeen is het zo dat ook groene daken de luchtstroming in de omgeving kunnen beïnvloeden. De mate waarin dat gebeurt hangt af van de hoogte van de beplanting op het dak en uiteraard van de hoogte van de bebouwing zelf. Studies die de effecten van groene daken evalueren nemen dit soort effecten voor zover bekend niet mee.

Of, en in hoeverre, toepassing van groene daken de luchtkwaliteit significant verbetert, is op dit moment nog niet te beoordelen.

### 5.4 Lokale effecten

Bij de gebiedsgerichte inzet van vegetatie moet in het algemeen worden opgelet dat deze de luchtstroming in de buurt van verkeer niet beïnvloedt. Elke obstructie van de stroming in een straat, of dat nu het gevolg is van gevel- en dakgroen, blokhagen en andere laagblijvende vegetatie, leidt tot hogere verkeersbijdragen, zie ook hoofdstuk 4. Door de porositeit van de betreffende vegetatie te verminderen kunnen de concentratie-effecten worden beperkt, maar nooit voorkomen.

### 5.5 Samenvatting

Het is evident dat grote gebieden die met bomen en planten zijn gevuld een positief effect op de luchtkwaliteit hebben. Aan een kant zijn er minder bronnen

van luchtvervuiling maar er wordt ook meer vervuiling afgevangen dan in een omgeving zonder vegetatie.

Het is echter lastig om de effecten van vegetatie in een groot gebied goed te kwantificeren. Waar dit wordt getracht zijn de berekende effecten van vegetatie op concentraties klein en met veel onzekerheden omgeven. Een schatting voor een verkeersloze straat in een Nederlandse straat geeft een afname van de  $PM_{10}$ -concentraties ten gevolge van bomen in de straat van circa 0.2%. De  $NO_2$ -concentraties nemen in die situatie door complexe chemische effecten juist met 1-3% toe.

## 6 Recent onderzoek langs wegen en in straten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van verschillende onderzoeken in Nederland besproken die ten tijde van de rapportage in 2008 (Wesseling, 2008) nog liepen of nog moesten starten. Tevens wordt kort stilgestaan bij enkele metingen aan ultrafijne deeltjes en een serie van beschouwingen op basis van recent windtunnelonderzoek in Duitsland.

Verder wordt een overzicht gegeven van de sinds 2008 verschenen (internationale) wetenschappelijke artikelen en reviews binnen het vakgebied luchtkwaliteit. Er is gezocht binnen de bibliografische database SCOPUS. De resulterende titels zijn allemaal beoordeeld op relevantie. De meeste artikelen beschreven de invloed van luchtverontreiniging op vegetatie, in plaats van andersom, en vielen alsnog af. Uiteindelijk bleven negen artikelen over. De meesten daarvan hadden de *negatieve* invloed van vegetatie op de luchtkwaliteit als onderwerp namelijk: verspreiding van pollen (twee keer), invloed op dispersie in drukke straten (drie keer), emissie van vluchtige organische effecten (twee keer). Van de resterende twee artikelen gericht op de positieve invloed had er één betrekking op geluidswallen in combinatie met vegetatie en één op groene daken. Het artikel over geluidswallen wordt in dit hoofdstuk besproken, het artikel over groene daken is al in paragraaf 5.3 besproken. De artikelen die betrekking hebben op dispersie in drukke straten zijn vooral gebaseerd op recent werk van Gromke, dat in paragraaf 6.5 wordt besproken.

### 6.1 Onderzoek van het InnovatiePlatform Luchtkwaliteit (IPL)

In het kader van het IPL heeft uitgebreid onderzoek aan vegetatie langs snelwegen plaatsgevonden; bij Vaassen langs de A50 en bij Valburg bij de A50. Het onderzoek bij Vaassen aan bestaande vegetatie is uitgevoerd door TNO, het ECN en het PRI, terwijl het onderzoek bij Valburg aan nieuwe vegetatie is uitgevoerd door een consortium, onder leiding van de stadsregio Arnhem-Nijmegen, bestaande uit Wageningen Universiteit (Alterra, WAU en ASG), KEMA en Integralis PP. De resultaten van beide onderzoeken zijn gerapporteerd in rapporten van het IPL, zie de website<sup>10</sup> van het IPL voor de volledige documentatie en alle rapporten.

Op beide locaties zijn uitgebreid metingen verricht aan de NO<sub>x</sub>-, NO<sub>2</sub>- en PM<sub>10</sub>-concentraties langs de snelweg op stukken met en zonder vegetatie. Verschillen tussen deze metingen op locaties met en zonder vegetatie moesten de effecten van de vegetatie duidelijk maken.

<sup>10</sup> <http://www.ipluchtkwaliteit.nl>

### 6.1.1 *Onderzoek Valburg*

Bij Valburg is langs de A50 een meetproef aan een speciaal voor dat doel aangeplante strook vegetatie langs de A50 gedaan (Erbrink, 2009). De bomen bestonden voor een deel uit dennen en voor een deel uit linden.



*Figuur 24 Aangeplante vegetatie voor de metingen bij Valburg (bron: RIVM).*

In een overzicht van de resultaten, gepresenteerd op de conferentie in Antwerpen, geeft Hofschreuder (2010) aan dat vegetatie in het algemeen niet kan worden gebruikt om lokale problemen met luchtkwaliteit ( $\text{NO}_2/\text{PM}_{10}$ ) op te lossen of om dichterbij een weg te kunnen bouwen. Er zijn in de metingen aanwijzingen gevonden voor depositie van  $\text{NO}_x$  in de vegetatie. Op basis van de metingen kan, volgens Hofschreuder, niets worden gezegd over depositie van deeltjes ( $\text{PM}_{10}$ ) in de vegetatie.

De resultaten die door het consortium zijn verspreid betreffen allemaal resultaten waarover geen overeenstemming bestaat. Bij de presentatie en analyse van de resultaten uit de metingen bij Valburg bleken het consortium en de begeleidingscommissie fundamenteel van mening te verschillen over de kwaliteit van de ijking van de metingen en daarmee over de bruikbaarheid van de conclusies die uit de metingen volgen. Deze verschillen bleken niet oplosbaar en uiteindelijk heeft de opdrachtgever van het project, Rijkswaterstaat, het rapport uitgebracht met de volgende kanttekening bij het voorwoord van het

rapport: 'Uiteindelijk hebben de doorgevoerde aanpassingen niet geleid tot een versie waarover finale overeenstemming bestaat over de onderzoeksresultaten van de metingen en interpretatie van dit deel van het onderzoeksrapport. Met name de kwaliteit van de metingen (dataset en de kalibratie van de metingen) is volgens deskundigen van DVS en het RIVM tot nu toe onvoldoende aangetoond. De bijdragen van VITO en KEMA zijn wel van voldoende kwaliteit maar zijn echter ook gebaseerd op de metingen.' Bij de acceptatie van het rapport is verder vermeld 'in verband met verschil van inzicht over de onderzoeksresultaten tussen DVS en het consortium is het rapport alleen geaccepteerd door de Projectleider', dit in tegenstelling tot de andere rapporten binnen het IPL die ook door het management van Rijkswaterstaat zijn geaccepteerd. Als gevolg van alle discussies en verschillen van inzichten dienen deze resultaten terughoudend te worden gezien en kunnen hier geen conclusies aan worden verbonden.

#### 6.1.2 *Aanvullend onderzoek Valburg*

Gedurende de laatste maanden van de experimenten in Valburg zijn er op advies van het RIVM door M+P aanvullende metingen verricht met behulp van TEOM's. Deze apparatuur is in principe in staat om verschillen in PM<sub>10</sub>-concentraties in de orde van (enkele) microgrammen per kubieke meter te meten. De conclusies van deze metingen waren dat:

- 'Als gekeken wordt naar de totale PM<sub>10</sub>-concentratie bij westenwind achter de vegetatie en in de doorsnede zonder vegetatie, dan blijkt dat de concentraties op de meetposities in deze doorsneden (meetlijnen) niet significant van elkaar verschillen.'
- 'Als gekeken wordt naar de "wegbijdragen" dan blijkt dat de concentratie PM<sub>10</sub> achter de vegetatie circa 10% lager is dan op de niet-afgeschermdede doorsnede. Het 95%-betrouwbaarheidsinterval bedraagt ± 8%.'

Volgens M+P lijkt het er op basis van hun metingen op dat het effect van de vegetatie maximaal circa 10% is, met een praktisch even grote onzekerheid. Ook wordt opgemerkt dat op basis van de metingen niet kan worden aangegeven waardoor dit effect op de concentraties gerealiseerd wordt. Dit kan zowel het resultaat zijn van de vegetatie als 'stromingsobstakel' (zie ook de IPL-rapportages over de effecten van geluidsschermen) als van depositie in het groen.

#### 6.1.3 *Onderzoek Vaassen*

De vegetatiestrook langs de A50 bij Vaassen waaraan door TNO, ECN en PRI is gemeten betrof een bladverliezende vegetatie in een bestaande situatie.



*Figuur 25 Vegetatie bij de metingen in Vaassen (bron: RIVM).*

Daarom is er zowel in de zomer- als in de wintersituatie gemeten. De invloed van de vegetatie is in de zomerperiode het sterkst door de aanwezigheid van het blad. Naast de metingen is door TNO ook gerekend aan de situatie met het CFD model 'PanAir'.

De conclusies van het eindrapport zijn (citaat, (Vermeulen, 2009)):

- In model en metingen zijn de effecten op de concentratie relatief laag (0-26% voor  $\text{NO}_2$  en <5% voor  $\text{PM}_{10}$ ) en daarom moeilijk te meten met de campagne-gewijze aanpak zoals gekozen in het project. Wel kon de invloed van de vegetatie op windsnelheid en -richting goed worden vastgesteld en is voor de fijn stof-deeltjes kleiner dan 1 micrometer vastgesteld dat het effect van filtering door de vegetatie nihil is.
- Voor het totaal aan fijn stof en  $\text{NO}_x$  kan ook geen filtering door vegetatie worden vastgesteld, maar daarbij speelt de meetonzekerheid een grote rol. Het vegetatie-effect lijkt in ieder geval kleiner dan 10-31% van de verkeersbijdrage en hangt alleen samen met de invloed van de vegetatie op de turbulentie en is alleen positief in de zomer. Het effect is dan alleen positief voor  $\text{NO}_x$  op afstanden vanaf 40 meter van de weg, voor  $\text{NO}_2$  is het vegetatie-effect pas positief vanaf ongeveer 90 meter afstand. Voor de overige omstandigheden is het vegetatie-effect nihil tot negatief.



- De vermindering van windsnelheid achter de vegetatie leidt in de zomer niet tot sterk hogere concentraties voor  $\text{NO}_x$  en PM door het compenserende effect van een verhoogde verdunning.<sup>11</sup> Deze extra verdunning leidt in de zomer wel tot relatief hogere  $\text{NO}_2$ -concentraties direct achter de vegetatie door inmenging van extra ozon.

Volgens de CFD-modellering met PANAIR is het effect van de vegetatiestrook op de concentratiebijdrages van het verkeer langs de snelweg gering. De effecten op de concentratie worden volgens de studie grotendeels veroorzaakt doordat de bomen het windveld beïnvloeden. Hierdoor wordt de luchtstroming opgestuwd waardoor er lagere wegbijdragen achter de vegetatie kunnen ontstaan, gelijk aan het effect van een geluidsscherm.

#### 6.1.4 Proeftuin schermen IPL

In de proeftuin schermen van het IPL is een scherm getest dat voor een groot deel uit vegetatie bestaat, een product van Mostert de Winter (Hoogwerff, 2009). Het scherm bestond uit een meter dicht materiaal en daarboven 3 meter gaas waarop een redelijk dichte laag Hedera aan was gebracht, zie onderstaande foto (bron: IPL).



*Figuur 26 Zij-aanzicht van het vegetatiescherm van Mostert de Winter (bron: IPL).*

<sup>11</sup> Een lagere windsnelheid en een grotere verdunning kunnen elkaar compenseren.

Na analyse van de metingen bleek het netto effect op de NO<sub>2</sub>-concentratie  $-8 \pm 23$  % en het effect op de NO<sub>x</sub>-concentratie  $2 \pm 13$  % (dus hogere concentraties). De NO<sub>2</sub>-concentratie achter het scherm was gemiddeld dus groter dan in de situatie zonder scherm, hoewel het effect door de aanzienlijke onzekerheid niet significant is. Het gemiddelde effect op de NO<sub>2</sub> is wel in lijn met het beeld dat te dichte vegetatie langs een weg, door de beïnvloeding van de stroming, tot hogere concentraties kan leiden. Een mogelijk effect op de PM<sub>10</sub>-concentraties kon door technische problemen met de apparatuur gedurende de meetsessie niet worden bepaald.

#### 6.1.5 *Toepassingsadvies Rijkswaterstaat*

Het IPL-onderzoek is afgesloten met een samenvattend toepassingsadvies voor gebruik van vegetatie binnen Rijkswaterstaat. Voor wat betreft de aanleg van nieuwe vegetatiestroken bij luchtkwaliteit knelpunten luidt het advies:

‘Op basis van de resultaten die uit de onderzoeken naar voren zijn gekomen, is het advies de maatregel, aanplanten van nieuwe vegetatiestroken, niet toe te passen ten behoeve van verbetering van de luchtkwaliteit langs snelwegen. De concentraties dicht bij de weg kunnen dan immers toenemen. Wanneer er al een positieve invloed is, vooral in de zomer, dan is dit op afstanden van meer dan 50 meter van de rand van de weg. Wanneer er echter weinig blad aan de bomen is, zoals in de winter, kan er op grotere afstanden van de weg (tussen 50 en 100 meter) ook sprake zijn van een sterker negatief effect op de NO<sub>x</sub>-concentraties. Gezien de lage depositiesnelheid van NO<sub>2</sub> en PM<sub>10</sub> is substantiële reductie van de concentraties pas te verwachten bij veel bredere vegetatiestroken, in de orde van grootte van honderden meters tot kilometers.’ (Schraa, 2009).

De studies van het IPL hebben zich vooral gericht op de mogelijke filterende werking van vegetatie. Indien een groenelement zo groot en/of dicht begroeid is dat er geen of nauwelijks meer lucht doorheen stroomt, is er uiteraard geen sprake van filteren. Het element werkt dan vooral als stromingsobstakel. Indien een dergelijk element zich direct naast een weg bevindt kan het in principe, net als bijvoorbeeld een geluidswal, een (beperkte) positieve invloed op de concentraties hebben.

## 6.2 **Geluidswal in combinatie met vegetatie**

In Amerika is door Baldauf (2008) onderzoek gedaan naar het effect van een geluidsscherm op de luchtkwaliteit. Achter een deel van het geluidsscherm bevond zich een gebied met bomen en struiken. Het onderzoek beoogde dan ook om de invloed van een geluidsscherm in combinatie met vegetatie te onderzoeken. Zowel de CO-concentraties als deeltjesaantallen zijn gemeten. De

experimenten lieten deels lagere concentraties achter het geluidsscherm zien. Er waren echter ook situaties waarin de concentraties achter het geluidsscherm hoger bleken dan zonder geluidsscherm. De hoogte van de vegetatie in het gebied achter het geluidsscherm varieerde. De metingen langs de meetlijn met hogere vegetatie lieten lagere deeltjesaantallen zien. De auteurs van de studie merken echter op dat de aanwezigheid van de vegetatie tot meer turbulentie en dus lagere concentraties kan leiden. Filtering door de vegetatie kon binnen de studie niet worden uitgesloten maar ook niet worden geconstateerd.

### **6.3 Binnenstedelijk effect van vegetatie**

In opdracht van de gemeente Amsterdam heeft TNO onderzoek gedaan naar het effect van verschillende maatregelen in de Jan van Galenstraat in Amsterdam (Keuken, 2009). Met betrekking tot de inzet van vegetatie bestond het onderzoek uit twee delen:

#### Effect van het bladerdak

Uit de metingen van roetdeeltjes en stikstofdioxide is door TNO geconcludeerd dat de bomen (platanen) met bladeren in de lente en zomer, de verspreiding van luchtvervuiling in een straat met druk verkeer belemmeren. Het effect van de belemmering, hogere concentraties in de straat, wordt niet gecompenseerd door de luchtzuiverende werking van de bomen. Het netto effect van de toename van de bladeren is dus dat de luchtkwaliteit slechter wordt.

#### Afscherming door een haag of plastic

Uit de metingen wordt door TNO geconcludeerd dat een haag dicht langs een wegrand functioneert als een blokkade voor de verspreiding van luchtverontreiniging. De mate waarin is afhankelijk van de dichtheid van begroeiing. Door de blokkade wordt luchtvervuiling van verkeer omhoog gestuwd. Dit is het meest effectief dicht bij de weg, maximaal 1 meter van de wegrand. Volgens TNO geldt als vuistregel dat achter een haag op een afstand van circa vijfmaal de hoogte van de haag, de concentraties weer hetzelfde zijn alsof er geen haag was geplaatst. Achter een even hoog plexiglasscherm zijn de concentraties echter lager dan achter de haag. Dit kan worden verklaard door de betere afscherming van het plexiglas dan door de haag.

#### Emissies versus depositie

In het rapport wordt ook stilgestaan bij de vraag hoe de vaak gebruikte schatting voor depositie, van 100 gram per stadsboom per jaar, zich verhoudt tot de hoeveelheid verkeersemisies in een drukke straat. Onderstaande berekening is overgenomen uit het rapport van TNO.

In de Jan van Galenstraat rijden circa 20.000 voertuigen per etmaal waarvan circa 5% vrachtauto's. De emissiefactoren voor personenvoertuigen en vrachtauto's in 2010 zijn respectievelijk 57 en 360 mg PM<sub>10</sub>/km. De gemiddelde emissiefactor voor het stadsverkeer in de Jan van Galenstraat is 72 mg PM<sub>10</sub>/km oftewel 1400 g PM<sub>10</sub> per km per etmaal. Wanneer wordt uitgegaan van een boom per 25 m, dan bedraagt de emissie 35 g PM<sub>10</sub>/boom per etmaal. De afvangst is gemiddeld 100 gram per jaar, overeenkomend met 0.5 gram PM<sub>10</sub> per boom per etmaal in de periode met bladeren aan een boom. Hieruit volgt dat de afvangst 0.5/35, oftewel 1.5% van de emissies bedraagt (Keuken, 2009).

## 6.4 Studies door het VITO

### 6.4.1 *Lage haag of scherm langs provinciale weg Waalre*

In opdracht van de gemeente Waalre heeft het VITO<sup>12</sup> (Vlaamse instelling voor technologisch onderzoek) in 2009 berekeningen uitgevoerd aan de effecten van een lage haag of scherm van dezelfde hoogte (circa 1 meter hoog) langs de provinciale weg N69 op de luchtkwaliteit (Vankerkom, 2009). De berekeningen zijn uitgevoerd met het CFD-model ENVI-met. De conclusie van de studie luidt:

'Uit de resultaten van de ENVI-met berekeningen kan besloten worden dat het plaatsen van een muur of massief scherm te verkiezen is boven het plaatsen van een haag. Met een muur of massief scherm worden op de rijbaan zelf hogere luchtconcentraties vastgesteld dan wanneer een haag wordt geplaatst. Anderzijds wordt vastgesteld dat langs de gebouwen lagere concentraties worden gemodelleerd. Vermits deze verlaging wordt gerealiseerd op plaatsen waar meer mensen (permanent) verblijven, is dit vanuit het perspectief van blootstelling de beste keuze. Na de plaatsing van de haag worden bijna uitsluitend verhoogde concentraties gemodelleerd, zowel op de rijbaan als langs de huizen.'

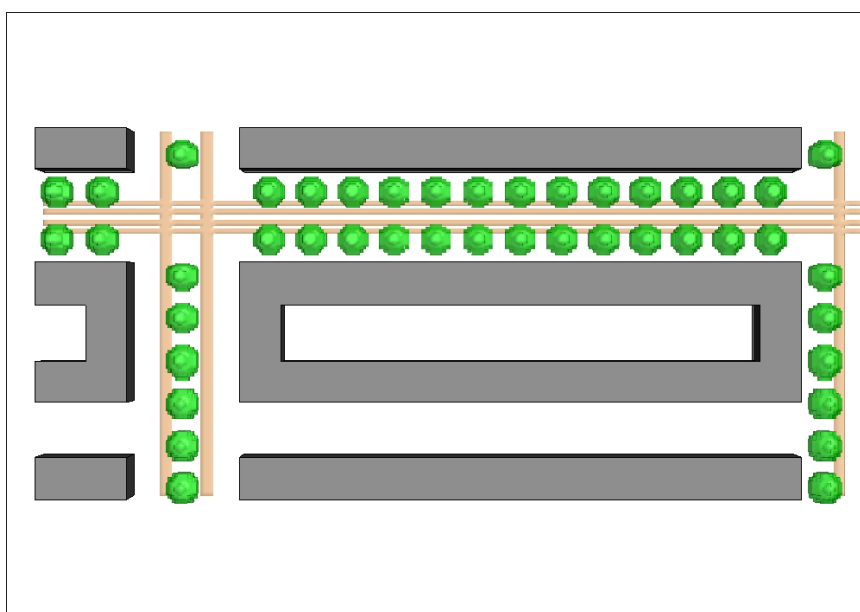
De auteurs merken op dat zij de conclusie, dat een muurtje meer effect heeft dan een even zo hoge haag, verrassend vinden. De reden die ze zelf geven is echter betrekkelijk simpel. De vegetatie zoals in de studie is gebruikt, is te beperkt in hoogte en volume om op korte afstand een rol van belang te kunnen spelen in het verwijderen van verontreinigingen. De veranderingen in concentraties die hier door de beide maatregelen, muur en haag, worden geïntroduceerd, zijn het gevolg van een aerodynamisch effect van de beide barrières op het windveld. Gezien de porositeit van een haag is deze volgens VITO minder in staat om de uitgestoten emissies te concentreren boven de rijweg zoals in het geval van het muurtje. Net als in de studie voor Vaassen

<sup>12</sup> Het VITO is een organisatie in Vlaanderen, België, die grofweg vergelijkbaar is met TNO in Nederland.

wordt geconcludeerd dat de depositiesnelheid zodanig klein is dat de totale depositie niet tot een concentratieafname van betekenis leidt.

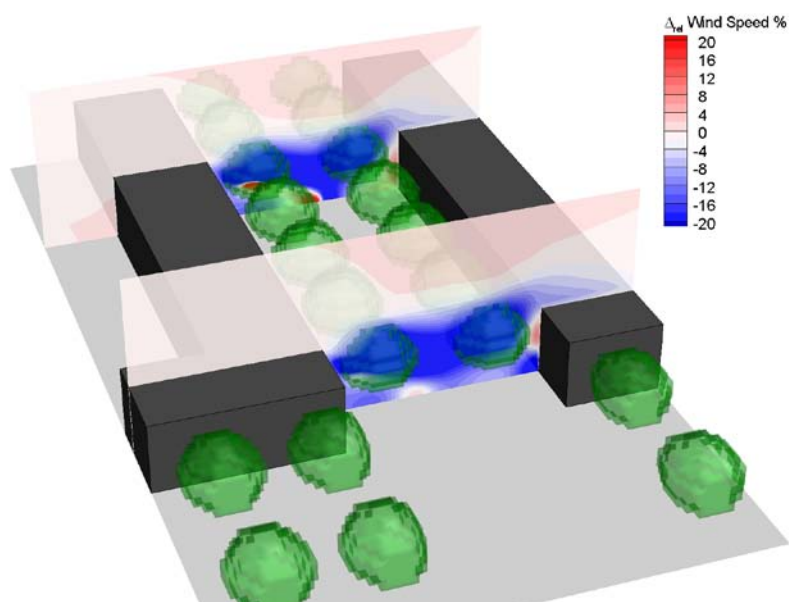
#### 6.4.2 *Street canyon met bomen*

In opdracht van het CROW heeft het VITO in 2010 en 2011 met ENVI-met berekeningen uitgevoerd aan de effecten van bomenrijen in een typische Nederlandse brede street canyon (De Maerschallck, 2011). Het RIVM en het PRI (Plant Research Institute, Wageningen) hebben een teststraat gedefinieerd met daarin aan beide zijden niet al te grote bomen. In de Nederlandse 'Standaard Reken Methode 1' zou deze straat een bomenfactor van 1.25 toebedeeld krijgen. Voor het volledige rapport wordt verwezen naar (De Maerschallck, 2011) maar hieronder worden enkele resultaten besproken. Het rekendomein is hieronder geschetst voor het geval de wind onder 45 graden van linksonder in de figuur komt. De verkeersbronnen zijn met de oranje strepen aangegeven, de bomen met de groene bollen.



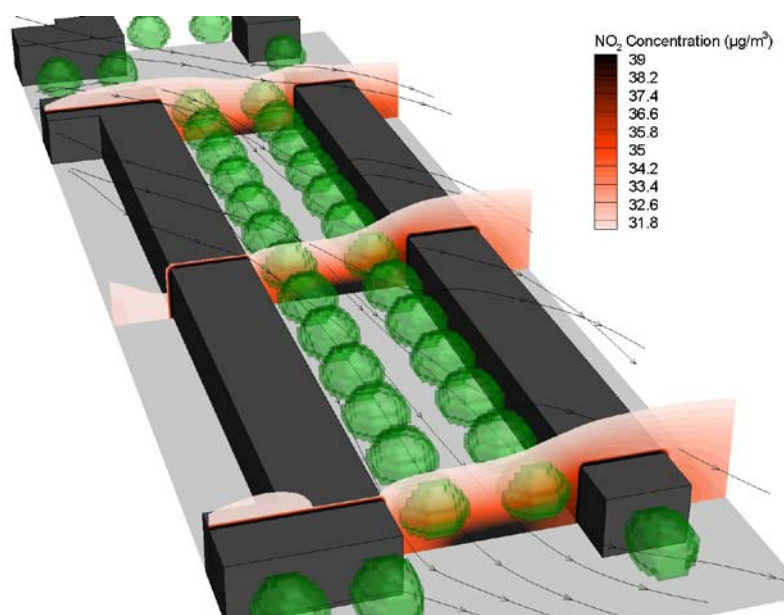
*Figuur 27 Rekendomein voor ENVI-met bij schuine aanstroming vanaf linksboven in de figuur.*

In de uitgevoerde berekeningen is direct het effect van de bomen in de straat op de windsnelheden te zien. Onderstaand wordt de verandering van de windsnelheid dwars op de straat getoond. Ter hoogte van de bomen en daaronder neemt de windsnelheid met circa 20% af. De verlaging van de windsnelheid en van de turbulentie hebben een negatief effect op de verversing van de lucht in de street canyon en op het verdunnen van de lokale verkeersemissies.



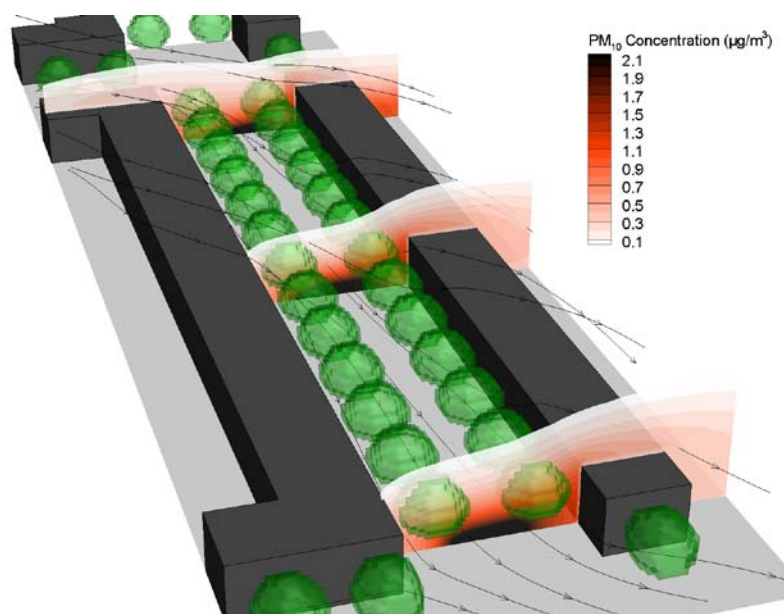
*Figuur 28 Berekende effect op de windsnelheid bij schuine aanstroming vanaf linksboven in de figuur.*

Voor NO<sub>2</sub> is volgens het VITO onder alle windrichtingen een verhoging waarneembaar van de gemiddelde concentraties langs de straatkant, variërend van 3-6% op de totale NO<sub>2</sub>-concentratie. Omdat de vegetatie vooral effect heeft op de verspreiding van de lokale emissies zal bij een verhoogde verkeersintensiteit het negatieve effect van de vegetatie nog versterkt worden. Wegens de chemische reacties is het effect van de vegetatie op de NO<sub>2</sub>-concentratiebijdrage van het wegverkeer lastig exact te specificeren. Het effect is echter aanzienlijk, afhankelijk van de windrichting varieert het tussen de +30% en +60%. Hierbij zijn de concentraties gemiddeld over het gehele voetpad langs de weg, op een hoogte van 1.5 meter.



*Figuur 29* Berekende NO<sub>2</sub>-concentraties bij schuine aanstroming vanaf linksboven in de figuur.

Het effect van de bomen op de windsnelheid en turbulentie is een verhoging van de lokale verkeersbijdrage PM<sub>10</sub> op straatniveau, variërend van 10% ingeval de wind parallel aan de straatrichting staat, tot 30% wanneer de wind loodrecht op de street canyon staat. Eenzelfde conclusie kan getrokken worden voor PM<sub>2,5</sub>.



*Figuur 30* Berekende PM<sub>10</sub>-concentratiebijdragen bij schuine aanstroming vanaf linksboven in de figuur.

De berekeningen zijn uitgevoerd met gemiddelde depositiesnelheden voor PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub>. In aanvulling hierop zijn ook berekeningen gedaan met sterk verhoogde depositiesnelheden, 'superbomen'. Voor PM<sub>10</sub> heeft dit een duidelijk

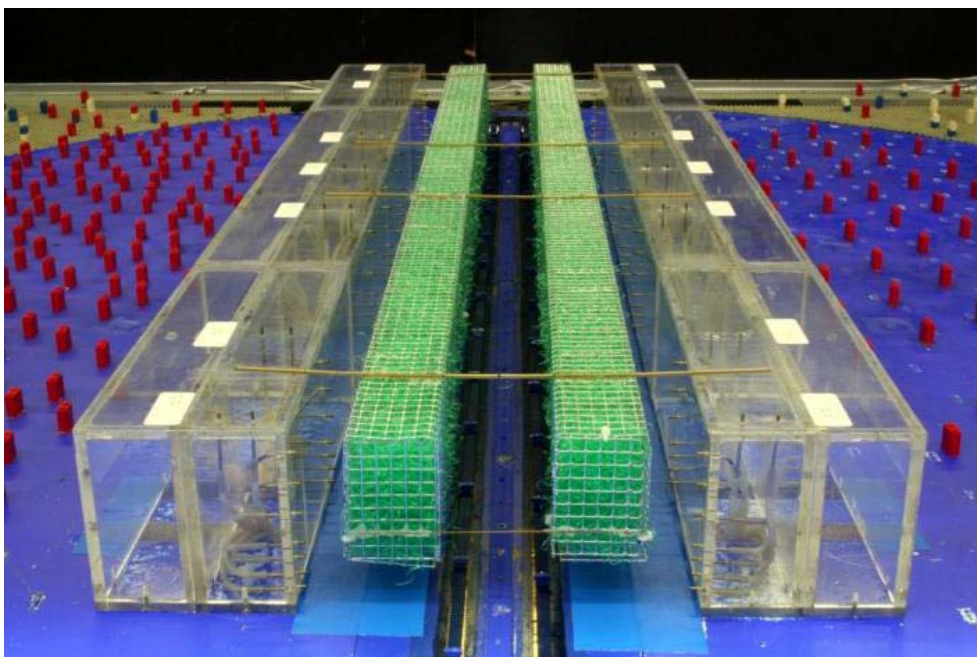
effect, voor de gezondheidsrelevante  $PM_{2,5}$  deeltjes echter niet. Het VITO concludeert dat men binnen de uitgevoerde studie geen positief effect van vegetatie op de  $PM_{2,5}$ -concentratie in een street canyon heeft kunnen aantonen, alleen een verhoging van de concentraties. Verder is van belang dat het rapport het volgende constateert: 'In het Nederlandse CAR model wordt voor dit type van street canyon een bomenfactor 1.25 aangenomen, dit is 25% verhoging van de lokale verkeersbijdrage in de street canyon als gevolg van de aanwezigheid van de bomen in de straat. Deze 25% ligt in ieder geval binnen de range van de resultaten die uit deze studie [van VITO] komen.'

De onzekerheden in het soort van berekeningen dat VITO heeft uitgevoerd is aanzienlijk. Voor CFD-berekeningen moeten veel rekenparameters worden ingesteld en de 'beste' keuze is daarbij niet altijd evident. Een andere belangrijke bron van onzekerheden zijn de fysische parameters die worden gebruikt om de realiteit te benaderen. Een simpel voorbeeld hiervan is de keuze voor de te hanteren depositiesnelheid. De juiste waarde voor een specifieke soort van vegetatie is zelden goed bekend. Door in de studie voor CROW met een range van depositiesnelheden te rekenen en de resultaten met velddata te vergelijken, zoals de gemiddelde depositie per jaar op een gemiddelde boom, kan een indruk worden verkregen van de onzekerheid in het rekenresultaat.

## 6.5 Windtunnelonderzoek Duitsland en numerieke modellen

Naar aanleiding van uitvoerig windtunnelonderzoek door Gromke (2007, 2008, 2009a, 2009b) zijn uitgebreide analyses gemaakt van de invloed van vegetatie in een street canyon. Hierbij zijn vergelijkingen gemaakt tussen de resultaten van windtunnelmetingen en berekeningen met numerieke rekenmodellen, 'Computational Fluid Dynamics'. Er zijn in de windtunnel metingen gedaan aan zowel enkele als dubbele rijen bomen in de straat. De geschatte meetonzekerheid van een windtunnel bedraagt circa 20%. De onzekerheid in verschilmetingen, zoals zonder en met vegetatie, is kleiner. De windtunnelmetingen konden de depositie van fijn stof en de opname van gasvormige stoffen niet in rekening brengen. Hierdoor ontstaat een extra onzekerheid in het uiteindelijke effect van de vegetatie.





Figuur 31 Configuratie voor windtunnelmetingen (bron: Gromke).

Op basis van de metingen heeft Gromke (2009c) een formule opgesteld voor de maximale verhouding van concentraties in een street canyon, met en zonder vegetatie. De hoeveelheid vegetatie en de porositeit daarvan zijn parameters in de relatie. Gemiddeld is de maximale verkeersbijdrage met bomen een factor 1,9 hoger dan zonder bomen.

De metingen van Gromke zijn ook gebruikt om de resultaten van CFD-berekeningen mee te vergelijken. Zowel de windtunnelresultaten als die van de berekeningen wijzen op verlaagde windsnelheden in de straat en daarmee verhoogde concentratiebijdragen van het verkeer. Bij de berekeningen doen modellen die het Reynolds Stress Model (RSM) gebruiken het beter dan modellen die het  $k-\varepsilon$  model gebruiken. De exacte waarde van het turbulente Schmidt-getal in de CFD-berekeningen bleek van belang om de windtunnelresultaten beter te reproduceren. Aangezien commercieel beschikbare CFD-modellen standaard waardes voor dit getal gebruiken, wordt in Gromke (2008) de aanbeveling gedaan om de waarde van het gebruikte Schmidt-getal in het pakket kritisch te beschouwen. De verschillende resultaten zijn ondergebracht in een database op de site [www.codasc.de](http://www.codasc.de).

## 6.6 Metingen aan ultrafijne deeltjes

Zoals al genoemd is in een studie van de TU Delft de deeltjesgrootteverdeling onderzocht van fijn stof dat is gedeponeerd op langs de geluidswallen aangebrachte vegetatie. Daarbij zijn de aantallen deeltjes in diverse categorieën deeltjesgrootten geteld. De studie laat zien dat de gedeponeerde deeltjes zich

vooral in de fractie tussen 0.5 – 1.5  $\mu\text{m}$  bevinden en niet in de fractie  $< 0.5 \mu\text{m}$  (Ottel , 2010). De auteurs schatten dat er in totaal circa  $1.5 \cdot 10^{10}$  deeltjes (15 miljard deeltjes) per  $\text{m}^2$  blad (onder en bovenkant) zijn geadsorbeerd op de straatlocatie en circa  $0.9 \cdot 10^{10}$  deeltjes per  $\text{m}^2$  blad zijn geadsorbeerd op de achtergrondlocatie. De periode waarin dit aantal deeltjes op het blad is gedeponerd is niet vermeld in het artikel. Volgens (Bartfelder en K hler, 1987) kan Hedera helix (een klimplant) uitgroeien tot het 2.6 tot 7.7  $\text{m}^2$  blad per  $\text{m}^2$  muur heeft. Een grove schatting komt dan neer op een adsorptievermogen van circa  $7.7 \cdot 10^{10}$  deeltjes per  $\text{m}^2$  muur langs een weg.

In het proefschrift (Ottel , 2011), waarop het artikel is gebaseerd, wordt ingegaan op de vermindering van de windsnelheid in op de gevel aangebrachte vegetatie. Het effect op de windsnelheid in de straat, en de bijkomende toename van concentratiebijdragen, wordt niet besproken.

Een soortgelijk onderzoek is gerapporteerd door Sternber (2010). Hierbij is de hoeveelheid deeltjes op 'Hedera helix L' onderzocht. Het onderzoek is uitgevoerd op drie locaties in Oxford, Engeland: een straat met druk verkeer, een straat met beperkt verkeer en een rurale locatie op minder dan een kilometer van een drukke snelweg. Op de bladeren worden deeltjesaantallen tot  $2.9 \cdot 10^{10}$  per  $\text{m}^2$  gevonden. Langs de drukke straat werden in de deeltjes onder andere elementen gevonden die geassocieerd worden met dieselemissies, zoals (C, Na, Mg, K, Al, Si, P, Cl) en kolenverbranding (Al, Si, Fe, Ca, S, Na) (Searle, 2001). De laatste emissies zijn vermoedelijk van een 30 kilometer verder gelegen kolencentrale.

Volgens recente metingen aan aantallen ultrafijne deeltjes (Zuurbier, 2011) komen op en langs wegen aantallen van circa  $3 \cdot 10^{10}$  per  $\text{m}^3$  voor. Bij een gemiddelde windsnelheid van 1 m/s komen er dus elke seconde  $3 \cdot 10^{10}$  deeltjes door een oppervlak van 1  $\text{m}^2$ . Vergeleken hiermee zijn de aantallen deeltjes die op de bladeren worden gevonden zeer beperkt. Hoewel het effect van Hedera op de luchtkwaliteit door de beide studies niet kunnen worden gekwantificeerd, volgt uit bovenstaande verhouding al dat het effect ook zeer beperkt zal zijn. De mogelijke negatieve effecten van de vegetatie op de luchtstroming in de straat is in geen van beide artikelen besproken.

## 6.7 Conferentie 'Local Air Quality and its Interactions with Vegetation'

Begin 2010 is in Antwerpen de wetenschappelijke conferentie 'Local Air Quality and its Interactions with Vegetation' georganiseerd door VITO en de universiteit van Antwerpen. Zie de website <http://193.191.168.142/AQ-Vegetation-workshop/> voor het programma en de bijdragen op de conferentie.

Tijdens de conferentie bleek uit de verschillende bijdragen dat er in de situatie van vegetatie in een straat (street canyon) bij de aanwezigen eigenlijk geen twijfel meer bestaat over de potentieel negatieve effecten van de vegetatie op de luchtkwaliteit. Ook is duidelijk dat praktisch alle theorieën en metingen er op wijzen dat de depositie van  $PM_{10}$  (en kleiner) in/op vegetatie geen rol van betekenis speelt in zaken van luchtkwaliteit. Dat wil niet direct zeggen dat er geen depositie is, maar wel dat additionele depositie door het (bij)planten van vegetatie geen wezenlijke positieve bijdrage aan de luchtkwaliteit geeft.

Met betrekking tot rekenen met CFD-modellen is op de conferentie duidelijk geworden dat daar nog grote onzekerheden bij voorkomen en dat de eenvoudiger turbulentiemodellen (de zogenaamde k- $\epsilon$ -modellen) nog lang geen compleet en betrouwbaar beeld van de situatie kunnen geven. Er worden wel serieuze vergelijkingen gemaakt tussen windtunnels en CFD-modellen maar die zijn nog vooral academisch van aard. Recente academische CFD-modellen bevatten additionele software om de specifieke invloed van vegetatie op de impuls en turbulentie van de lucht in rekening te brengen. Deze submodellen zijn voorlopig nog niet in de eenvoudigere 'productiemodellen' te verwachten.

## 6.8 Samenvatting

De afgelopen jaren is er in Nederland uitgebreid onderzoek verricht naar de invloed van vegetatie op de luchtkwaliteit langs wegen en in straten.

Verschillende onderzoeken in Nederland aan de A50 laten geen duidelijk significant effect van de vegetatie op de luchtkwaliteit zien. Afhankelijk van de soort stof en de specifieke situatie (meteorologie, geometrie) zijn in de situaties met vegetatie zowel hogere als lagere concentraties gevonden, dan wel werd er geen effect van de vegetatie op de concentraties gevonden. Eenzelfde situatie deed zich voor bij metingen van het IPL aan een geluidsscherm dat uit vegetatie bestond. Ook in een Amerikaanse studie aan een geluidsscherm in combinatie met vegetatie kwamen de concentraties soms hoger en soms lager uit. Filtering door de vegetatie kon binnen de studie niet worden uitgesloten maar ook niet worden geconstateerd. De onzekerheid in de effecten van vegetatie op de luchtkwaliteit rond snelwegen is dan ook aanzienlijk. Er kan in ieder geval wel met redelijke zekerheid worden geconstateerd dat er geen significant positief effect van vegetatie langs wegen op de luchtkwaliteit is.

Voor binnenstedelijke situaties laten alle beschikbare studies, veldmetingen, windtunnelstudies zowel als berekeningen, zien dat de concentraties in een straat met vegetatie door de invloed van de vegetatie op de luchtstroming hoger zijn dan zonder vegetatie. Dit geldt zowel voor bomen als voor kleinere hagen.

Het concentratieverhogende effect van vegetatie op de luchtkwaliteit in straten door stromingsbelemmering is aanzienlijk en betrekkelijk simpel te constateren. De onzekerheid is dus relatief klein. Het concentratieverlagende effect van vegetatie op de luchtkwaliteit door depositie is klein en lastig om significant te constateren. De onzekerheid is dus relatief groot.

De bomenfactor in het programma CAR is in lijn met de beschikbare studies.

De beperkt beschikbare metingen aan ultrafijn stof laten zien dat, hoewel er zeker sprake is van een substantiële depositie, de effecten op de concentraties in de buitenlucht vermoedelijk beperkt zijn.

## 7 Conclusies en aanbevelingen

Vegetatie (bomen en planten) zorgt voor een prettige leefomgeving en heeft overwegend positieve effecten op de gezondheid. Nog los van de 'directe' positieve effecten van groen op de gezondheid is een groene omgeving doorgaans ook goed voor de luchtkwaliteit. Immers, in parken en bossen rijden geen auto's. Hoe meer ruimte er is voor groen in en om een stad, hoe beter dat in het algemeen is voor de luchtkwaliteit.

Luchtverontreiniging wordt afgevangen door bomen en planten, de verontreiniging deponeren op vegetatie. Beschouwingen waarin de hoeveelheid depositie wordt uitgezet tegen emissies geven echter een verkeerd beeld. De invloed van vegetatie op de luchtkwaliteit (en dus op de gezondheid) moet niet worden beoordeeld op basis van de geschatte depositie (afgevangen hoeveelheid per jaar), maar op basis van de concentratie *in de lucht*. Immers, de concentratie in de lucht bepaalt hoeveel verontreiniging er ingeademd wordt. Centraal in dit rapport staat dan ook de vraag in hoeverre de inzet van groen de concentratie verontreinigende stoffen *in de lucht* verlaagt.

Het is evident dat grote gebieden die met bomen en planten zijn gevuld, bijvoorbeeld parken, een positief effect op de luchtkwaliteit hebben. Het is echter lastig om deze effecten goed te kwantificeren. Waar dit met berekeningen wordt getracht, zijn de berekende effecten van vegetatie op concentraties in de lucht klein en met grote onzekerheden omgeven. De invloed van groene gebieden zoals stadsparken is beperkt, de concentraties worden hierdoor volgens de huidige schattingen met minder dan 0.5% verlaagd. Studies naar de effecten van grootschalige inzet van extra vegetatie in een groot gebied, zoals een stad of groter gebied, laten effecten in de orde van procenten zien. Ook hier zijn de onzekerheden groot. Verder is de praktische uitvoerbaarheid onduidelijk.

Dit rapport staat uitgebreid stil bij de invloed van vegetatie op 'hot spot' locaties, zoals langs snelwegen en in of langs drukke binnenstedelijke wegen. In die situaties is niet alleen de opnamecapaciteit van de vegetatie van belang. Belangrijker is dat aanwezige vegetatie de luchtstroming beïnvloedt en zorgt voor minder verdunning van de verkeersemisies op die locaties. De lokale verkeersbijdrage neemt daardoor toe, terwijl juist die nadelig is voor de gezondheid. Vooral de zeer fijne deeltjes die door het verkeer worden uitgestoten zijn schadelijk voor de gezondheid, en de beschikbare studies laten zien dat juist deze fractie niet of nauwelijks door de vegetatie wordt opgenomen. De studies die sinds 2008 beschikbaar zijn gekomen bevestigen de eerdere constatering dat de inzet van vegetatie nabij verkeersbronnen niet leidt tot verbetering van de luchtkwaliteit, maar de luchtkwaliteit juist kan verslechteren.

Zowel vanuit oogpunt van luchtkwaliteit (concentraties) als vanuit gezondheidskundig oogpunt is het inzetten van vegetatie om de lucht te filteren langs of in drukke wegen of straten dan ook geen aan te bevelen maatregel.

Samenvattend kan worden geconstateerd dat de (grootschalige) inzet van vegetatie in een gebied of stad naar verwachting een zeer beperkt positief effect op de achtergrondconcentratie heeft. Zodra vegetatie de stroming van de lucht langs een weg of in een straat echter op de een of andere wijze belemmert, waardoor de stroomsnelheid afneemt, zal praktisch altijd sprake zijn van een potentieel aanzienlijk negatief effect op de luchtkwaliteit.

## Referenties

- Baldauf, R., E. Thoma, A. Khlystov, V. Isakov, G. Bowker, T. Long, R. Snow (2008) Impacts of noise barriers on near-road air quality, *Atmospheric Environment* 42 , 7502–7507.
- Barck, C., J. Lundahl, and G. Hallden (2005) Brief exposures to NO<sub>2</sub> augment the allergic inflammation in asthmatics. *Environ Research Jan;97(1)*: 58-66.
- Bealey, W.J., A.G. McDonald, E. Nemitz, R. Donovan, U. Dragosits, T.R. Duffy, D. Fowler (2007) Estimating the reduction of urban PM<sub>10</sub> concentrations by trees within an environmental information system for planners, *Journal of Environmental Management* 85, 44–58.
- Boogaard, H, G.P.A. Kos, E. Weijers, N.A.H. Janssen, P.H. Fischer, S. van der Zee (in press) Contrast in air pollution components between major streets and background locations: particulate matter mass, black carbon, elemental composition, nitrogen oxide and ultrafineparticle number. *Atmospheric Environment*.
- Burtscher, H. (2005) Physical characterization of particulate emissions from diesel engines: a review .*Journal of Aerosol Science; Issue 7*, 896-932.
- Davidson, C.I. & Y.L. Wu (1989) Dry deposition of particles and vapors. In *Acid precipitation*, Eds S.E. Lindberg, A.L. Page & S.A. Norton. pp. 103-216. Springer, Berlin.
- Eliassona, I., B. Offerle, C.S.B. Grimmond en S. Lindqvist (2006) 'Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon', *Atmospheric Environment* 40, 1–16.
- Erbrink, H., P. Hofschreuder, S. Jansen, V.H.M., Kuypers, B. de Maerschallck, F. Ruyten, E.A. de Vries, J. de Wolff (2009) 'Flora – Vegetatie voor een betere luchtkwaliteit', Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart, Delft, Rapportnummer DVS-2009-013.
- Gromke, C., B. Ruck (2007) Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon - Experimental investigation of the flow and concentration field. *Atmospheric Environment* 41, 3287-3302.
- Gromke, C., R. Buccolieri, S. Di Sabatino, B. Ruck (2008) Dispersion modeling study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and

numerical investigations - Evaluation of CFD data with experimental data. Atmospheric Environment. 42, 8640-8650.

Gromke, C., B. Ruck (2009a) Effects of trees on the dilution of vehicle exhaust emissions in urban street canyons. International Journal of Environment and Waste Management 4, 225-242.

Gromke, C., B. Ruck (2009b) On the Impact of Trees on Dispersion Processes of Traffic Emissions in Street Canyons. Boundary-Layer Meteorology 131, 19-34.

Gromke, C. (2009c) Einfluss von Bäumen auf die Durchlüftung von innerstädtischen Straßenschluchten. Dissertationsreihe am Institut für Hydromechanik IfH der Universität Karlsruhe (TH), Heft 2008/2, Karlsruhe.

Hoogwerff, J. en Christiaan Tollenaar (2009) Eindrapport praktijkmetingen invloed (geluids)schermen op de luchtkwaliteit langs snelwegen, Rapportnummer DVS-2009-014.

Hofschreuder, P., Vincent Kuypers, Barry de Vries, Stijn Jansen, Bart De Maerschack, Hans Erbrink, Joost de Wolff (2010) Effect of vegetation on air quality and fluxes of NOx and PM-10 along a highway, CLIMAQS Workshop 'Local Air Quality and its Interactions with Vegetation', January 21-22, Antwerp, Belgium.

Keuken, M. en K. van der Valk (2009) 'Effect maatregelen voor oplossen knelpunten luchtkwaliteit Amsterdam', TNO-034-UT-2009-00998\_RPT-ML.

Kovar-Panskus, A., P. Louka, J.-F. Sini, E. Savory, M. Czech, A. Aabdelqari, P. G. Mestayer and N. Toy (2002) 'Influence of geometry on the mean flow within urban street canyons – a comparison of wind tunnel experiments and numerical simulations', Water, air, and soil pollution: focus 2: 365–380.

Litschke, T. en W. Kuttler (2008) On the reduction of urban particle concentration by vegetation – a review. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 17, No. 3, 229-240.

Maas, J. (2009) 'Vitamin G: Green environments - Healthy environments', Universiteit Utrecht.

Maerschack, B. de, Peter Vos, Stijn Janssen, Tim Op't Eyndt (2011) Envi-met Modelanalyse: Effecten van Vegetatie op de Lokale Luchtkwaliteit in een Street Canyon, Studie uitgevoerd in opdracht van: CROW, VITO 2011/RMA/R/40.



Nowak, D.J., Gordon M. Heisler (2010) Air Quality Effects of Urban Trees and Parks, National Recreation and Park Association, RESEARCH SERIES, [www.NRPA.org](http://www.NRPA.org)

Ottel , M., H.D. van Bohemen en A.L.A. Fraaij (2010) Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls, Ecological Engineering, 36: 154-162.

Ottel , M. (2011) The green building envelope, Vertical greening, TU Delft.

Pattenden, S., G. Hoek, C. Braun-Fahrl nder (2006), NO<sub>2</sub> and children's respiratory symptoms in the PATY study. Occupational Environmental Medicine 63(12): 828-835.

Raupach, M.R., J.F. Leys, N. Woods, G. Dorr, H.A. Cleugh, A.C.T. Canberra (2000) Modelling the effects of riparian vegetation on spray drift and dust : the role of local protection, : CSIRO Land & Water.

Schraa, G.J. en A. Vermeulen (2009) Toepassingsadvies Vegetatie, Het advies t.a.v. de toepassing van vegetatie ter verbetering van de luchtkwaliteit langs snelwegen. Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart, Delft, Rapportnummer IPL-2b.

Searle, D. (2001) The comparative effects of diesel and coal particulate matter on the deterioration of Hollington sandstone and Portland limestone. PhD. Thesis.

Sternberg, T, Heather Viles, Alan Cathersides en Mona Edwards (2010) Dust particulate absorption by ivy (Hedera helix L) on historic walls in urban environments, Science of the Total Environment 409, 162-168

Tiwary, A, Danielle Sinnett, Christopher Peachey, Zaid Chalabi, Sotiris Vardoulakis, Tony Fletcher, Giovanni Leonardi, Chris Grundy, Adisa Azapagic, Tony R. Hutchings (2009) An integrated tool to assess the role of new planting in PM<sub>10</sub> capture and the human health benefits: A case study in London, Environmental Pollution 157, 2645–2653.

Vervoort, S., Josine van den Bogaard, Ingrid Walda (2009) Rotterdam gezond groen gewoon doen! , Een literatuurstudie naar de wetenschappelijke relatie tussen groen, gezondheid en milieu en aanbevelingen voor een gezond Rotterdams groenbeleid, GGD Rotterdam-Rijnmond en de DCMR.

Wesseling, J., R. Beijk, N. van Kuijeren (2008) Effecten van groen op de luchtkwaliteit. Status 2008, RIVM Rapportnummer 680705012.

Yang, J., Q. Yu, P. Gong (2009) Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago, *Atmospheric Environment*, 42 (31), pp. 7266-7273.

Zee, S.C. van der, Walda I.C., Dijkema, M.B.A., Kwekkeboom, J. Riet, N.F. van, Zuurbier, M. Brederode. N.E. van, (2008) GGD-richtlijn medische milieukunde: luchtkwaliteit en gezondheid, RIVM rapport 609330008.

Zuurbier, M.M.M. (2011) 'Commuters' air pollution exposure and acute health effects', Academisch proefschrift, Universiteit Utrecht, Utrecht.

J. Wesseling | S. van der Zee | A. van Overveld

Rapport 680705019/2011

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven  
[www.rivm.nl](http://www.rivm.nl)

augustus 2011

