

Onderzoek naar de luchtkwaliteit rondom een vegetatiestrook langs de snelweg

E.P. Weijers

G.P.A. Kos

W.C.M. van den Bulk

A.T. Vermeulen

ECN-E--07-011

Verantwoording

Dit rapport beschrijft het onderzoek naar het effect van een vegetatiestrook langs een snelweg op de concentraties van luchtverontreiniging. De studie is uitgevoerd in het kader van het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit (Dienst Weg- Waterbouwkunde, Rijkswaterstaat). In dit programma wordt in opdracht van de ministeries van V&W en VROM gewerkt aan innovatieve oplossingen die bijdragen aan verbetering van de luchtkwaliteit op en rond snelwegen. Het rapport is het resultaat van het onderzoeksproject met ECN nummer 7.0136.

Bij de uitvoering zijn veel mensen betrokken geweest. De inzet van de volgende ECN-collega's was onontbeerlijk: Aline Kraai, Peter Fonteijn, Hans van 't Veen, Piet Jongejan, Gerard de Groot en Arjan Hensen. Harry Otterman en collega's van Rijkswaterstaat, Oost-Nederland (Wegendistrict Veluwe) alsmede Jan te Riele en zijn vrouw, eigenaar van het land waarop de metingen zijn uitgevoerd, worden bedankt voor hun enthousiaste medewerking.

Abstract

This report presents downwind measurements of air quality around vegetation near a motorway. The study (first ever in the Netherlands) was performed by order of the Innovation Programme Air Quality. At a carefully selected location measurements of PM and NO_x were carried out downwind from a motorway in front of and (at various distances) behind a parallel orientated vegetation strip. Results are compared with synchronized data collected at a nearby location without vegetation (the 'reference' situation) and at the same distances from the motorway.

Major findings are:

- Comparing measurements in front of and behind the vegetation strip show that the presence of vegetation tends to lower PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations immediately behind the vegetation. However, no such change is apparent in the concentrations of NO and NO₂.
- The comparison with measurements executed without vegetation ('reference') indicate that concentration levels close to the vegetation strip are similar or somewhat higher.
- At a larger distance from motorway and vegetation (>30 m) NO and NO₂ concentrations tend to be lower than what is observed in the reference situation. This could not be determined for PM.

Inhoud

Lijst van tabellen	4
Lijst van figuren	4
Samenvatting	5
1. Inleiding	7
2. Doelstelling	8
3. Achtergrond	9
4. Meetopzet	10
4.1 Locatie en Vegetatie	10
4.2 Experimentele opstelling	12
5. Resultaten en Discussie	14
5.1 Inleiding	14
5.2 Windsnelheid	14
5.3 Gascomponenten	18
5.4 Fijn stof	20
6. Samenvattende conclusies	23
Referenties	26
Bijlage A	27
Bijlage B	28
Bijlage C	30
Bijlage D	32
Bijlage E	33
Bijlage F	38
Bijlage G	43
Bijlage H	45
Bijlage I	47

Lijst van tabellen

Tabel D.1	<i>Overzicht dagen met gunstige windrichting (230°-300°) tijdens de meetperiode (1 augustus 2007 - 15 oktober 2007). Op de meetdagen was er geen neerslag</i>	32
Tabel I.1	<i>Frequentietabel</i>	49
Tabel I.2	<i>Eisen meetlocatie</i>	49

Lijst van figuren

Figuur 4.1	<i>Meetlocatie langs de A50 nabij Vaassen: referentielijn (nabij hectometerpaal 216.6) en vegetatielijn (tussen hmp. 216.8 en 216.9)</i>	10
Figuur 4.2	<i>Foto's van de meetlocatie langs de A50</i>	11
Figuur 4.3	<i>Meetopstelling (niet op schaal)</i>	12
Figuur 5.1	<i>Verloop windsnelheid; U_{vv} is windsnelheid gemeten vlak voor de vegetatie</i>	15
Figuur 5.2	<i>Verloop windrichting (dd)</i>	16
Figuur 5.3	<i>Windsnelheden gemeten langs referentielijn op 3, 45 en 90 m van de snelweg, voor en achter de vegetatiestrook en op 45 en 90 m achter de vegetatie(meethoogte 3 m)</i>	17
Figuur 5.4	<i>Concentratiegradiënt NO</i>	19
Figuur 5.5	<i>Concentratiegradiënt NO₂</i>	19
Figuur 5.6	<i>Concentratiegradiënt CO₂</i>	20
Figuur 5.7	<i>Gemeten verloop van de concentraties voor de verschillende fijnstoffracties</i>	22
Figuur A.1	<i>Jaargemiddelde concentraties NO₂ en PM₁₀ berekend met het VLW-model (2005) voor de meetlocatie langs de A50 nabij Vaassen.</i>	27
Figuur E.1	<i>Windsnelheid gemeten op 3 en 6 m hoogte voor en achter de vegetatie (3 resp. 10 m van wegrand) en op het referentiepunt (3m van wegrand)</i>	34
Figuur E.2	<i>Als Figuur E.1, maar nu voor de windrichting</i>	35
Figuur F.1	<i>Gemiddelde concentraties op 25 augustus vlak voor en achter de vegetatiestrook en op het referentiepunt (3 m van de wegrand)</i>	38
Figuur F.2	<i>Gemiddelde concentraties op 26 september vlak voor en achter de vegetatiestrook</i>	39
Figuur F.3	<i>Gemiddelde concentraties op 3 oktober vlak voor en achter de vegetatiestrook</i>	40
Figuur F.4	<i>Gemiddelde concentraties op 4 oktober vlak voor en achter de vegetatiestrook en op het referentiepunt (3 m van de wegrand)</i>	41
Figuur F.5	<i>Gemiddelde concentraties op 5 oktober vlak voor en achter de vegetatiestrook en op het referentiepunt (3 m van de wegrand)</i>	42
Figuur G.1	<i>Concentraties en standaardafwijkingen achter de vegetatie op 45 en 90 m van de wegrand (4 oktober)</i>	43
Figuur G.2	<i>Concentraties en standaardafwijkingen langs de referentielijn en achter de vegetatie op 45 en 90 m van de wegrand (5 oktober)</i>	44
Figuur H.1	<i>Gradiënten fijnstofconcentraties na normering op PM₁</i>	45
Figuur I.1	<i>Locatie 1 A50 Vaassen: Oostzijde; voorzijde haag met smalle grasstrook</i>	48
Figuur I.2	<i>Locatie 1 A50 Vaassen: Oostzijde; achterzijde haag met ventweg en open weiland</i>	48
Figuur I.3	<i>Locatie 1 A50 Vaassen: Open terrein</i>	48
Figuur I.4	<i>Fotolocaties</i>	49

Samenvatting

In opdracht van het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit (IPL) is een pilotstudie uitgevoerd naar het effect van een groenelement langs een snelweg op de luchtkwaliteit. Voor het eerst in Nederland zijn dergelijke metingen uitgevoerd. Het veldexperiment dient als opmaat voor een breder opgezette campagne in de zomer van 2007. De metingen hier waren gericht op het vaststellen van verschillen in windsnelheid en concentraties van verontreinigingen voor, in en achter een vegetatiestrook. De geschiktheid van de locatie voor metingen als deze is vastgesteld in een voorafgaande studie (ES Consulting, 2006). Er zijn geen veranderingen aangebracht aan de structuur van de vegetatie, die bestaat uit een ca. 7 m brede strook van 10 meter hoge bomen met onderbegroeiing. Gemeten variabelen zijn windsnelheid en -richting, gascomponenten (NO, NO₂ en CO₂) en fijn stof (PM₁₀, PM_{2,5} en PM₁). Er is gemeten voor (3 m van de wegrand) en achter de vegetatie (10 m van de wegrand), en verder windafwaarts (45 en 90 m van de wegrand); dit is de zgn. 'vegetatielijn'. Gelijktijdig zijn vergelijkingsmetingen uitgevoerd langs een aansluitend weggedeelte zonder vegetatie (3, 45 en 90 m van de wegrand; 'referentielijn'). De randvoorwaarden voor de metingen waren gunstige windrichting, geen harde wind en geen neerslag. De in dit onderzoek verkregen dataset omvat 5 meetdagen.

In deze studie is de effectiviteit van groenelementen bestudeerd op basis van metingen uitgevoerd onder verschillende meteorologische condities en over een beperkte periode. Het resultaat is kwalitatief samengevat in de onderstaande tabel waarbij vergeleken wordt met eenzelfde situatie maar dan zonder groenelement.

Component	Afstand in meters			
	3	10	45	90
PM ₁₀	-	+	0	
PM _{2,5}	-	+	-/0	
NO	-/0	-	+	+
NO ₂	-/0	-	+	+

- verslechtering
- 0: geen verschil
- +:verbetering
- * significant

Op basis van analyse van de meetgegevens zijn de volgende conclusies te trekken over de vergelijking van de luchtkwaliteit tussen de 'vegetatielijn' en de 'referentielijn':

- Er is een lagere windsnelheid voor, in en achter de vegetatiestrook. Direct achter de strook (op een hoogte van 3 m) is de windsterkte een kleine 25% lager dan ervoor. Verder windafwaarts wordt een minimum waarde gemeten op ca. 35 m van de vegetatiestrook; de windsterkte is hier ca. 60-70% lager dan de snelheid van de achtergrondwind. Op het verste meetpunt achter de vegetatie (90 m van de wegrand) is de windsnelheid nog niet terug op achtergrondniveau.
- Filterend effect van de vegetatie
De gemeten gasconcentraties (NO, NO₂, CO₂) vlak achter de vegetatie wijken niet af van vlak ervoor. De concentraties rondom de vegetatie zijn wel (enigszins) verhoogd in vergelijking met de situatie zonder vegetatie: de verhoging achter de strook is maximaal 10%. Dit beeld keert in meer of mindere mate terug op alle vijf meetdagen. Het *netto* effect van enerzijds opname via huidmondjes (concentratieverlagend) en anderzijds verminderde verdunning door obstructie (concentratieverhogend) leidt in het geval van gassen vlak achter

de vegetatie kennelijk niet tot een verbeterde situatie (in vergelijking met de situatie zonder de vegetatie).

De vergelijkingsmetingen aan fijn stof vlak voor en vlak achter de vegetatiestrook laten wel *lagere* concentraties zien achter de strook. De afname door adsorptie (en depositie) van stofdeeltjes in de vegetatiestrook wordt geschat op 20% voor PM₁₀ en 17% voor PM_{2.5}.

- Effect op grotere afstand van de strook

De gelijktijdige metingen op grotere afstand van de vegetatiestrook suggereren, na de aanvankelijke toename direct achter de vegetatiestrook, lagere concentraties voor de gascomponenten achter de vegetatie vanaf ca. 30 m van de weg. Het verschil blijkt statistisch significant ($p < 0,05$) op 90 m afstand in het geval van NO₂. Gemiddeld over de afstand 45-90 m is het concentratieniveau ca. 20% lager dan langs de referentielijn. Een mogelijke verklaring kan zijn dat de vegetatiestrook (en obstakels i.h.a.) windafwaarts een golf van neerwaartse turbulentie achter het 'obstakel' veroorzaken. Deze toename in de verticale uitwisseling achter het groenelement kan inmenging veroorzaken van (schonere) lucht uit hogere luchtlagen.

Op grotere afstand van de weg en de vegetatie (≈ 45 m) zijn de fijnstofconcentraties van dezelfde orde van grootte als de (ongestoorde) referentiemetingen.

De gemeten waarden zijn representatief voor de situatie bij Vaassen langs de A50 en kunnen niet gebruikt worden voor andere situaties met vegetatie. De veldmetingen die in dit onderzoek zijn uitgevoerd laten echter geen uitspraken toe over andere locaties en over veranderingen in jaargemiddelde concentraties (m.n. PM₁₀) en eventuele gevolgen voor overschrijdingen. Daartoe is de meetperiode te kort. Om dergelijke uitspraken te kunnen doen is het noodzakelijk om continue metingen over een (veel) langere periode uit te voeren en op meer locaties. Dit dient dan in verschillende jaargetijden plaats te vinden. Tevens biedt dit (in theorie) de mogelijkheid het groenelement zodanig aan te passen dat een optimaal effect verkregen wordt.

1. Inleiding

Het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit (IPL) heeft het voornemen de mogelijkheid om groenelementen in te zetten ter verbetering van de luchtkwaliteit nader te bestuderen. Bij voldoende succes biedt het mogelijk een optie om concentraties op knelpunten te verlagen en normoverschrijdingen te voorkomen. De vraag die daarbij eerst beantwoord moet worden is of de modelresultaten en laboratoriumexperimenten te verifiëren zijn in de praktijk. Anders gezegd, zijn de voorspelde effecten wel meetbaar? Daartoe is in de zomer en herfst van 2006 een verkennende meetcampagne uitgevoerd. Niet eerder zijn dergelijke metingen in Nederland uitgevoerd. Een en ander vormt de opmaat voor een in de zomer van 2007 uit voeren grootschalig onderzoeksproject (DWW/IPL, 2007).

De campagne vond plaats op een locatie langs de A50 nabij Vaassen. De gekozen meetmethodiek is ‘vergelijkend’ met betrekking tot plaats en tijd. Het vergelijkende bestaat eruit dat gelijktijdig metingen zijn gedaan langs een wegvak zonder groenelement (‘referentie’) en een (aansluitend) weggedeelte waar zich een geschikt groenelement (‘vegetatie’) bevindt. In dit rapport zijn de aldus verkregen meetresultaten beschreven en geïnterpreteerd.

Op verzoek van de opdrachtgever bevat de onderhavige rapportage een beknopte beschrijving van doelstelling, achtergrondinformatie, meetopzet en belangrijkste resultaten. Voor achterliggende gegevens wordt verwezen naar de bijlage.

2. Doelstelling

Als doelen van deze pilotstudie zijn geformuleerd:

1. Het beschrijven van het effect van de gekozen vegetatiestrook langs een snelweg op de luchtkwaliteit in het benedenwindse terrein. Vragen hierbij zijn:
 - is opname van gassen c.q. adsorptie deeltjes door de vegetatie meetbaar?
 - wat zijn de concentratieveranderingen van gassen en deeltjes ten gevolge van veranderingen in het windveld?
 - hoe verhouden de concentratieniveaus rondom en achter de strook zich tot de ‘ongestoorde’ situatie (dus zonder vegetatiestrook)?
2. Het verkrijgen van meetwaarden rondom een vegetatiestrook. Deze dataset zal beschikbaar worden gesteld voor de toetsing van nog te ontwikkelen modellen.

3. Achtergrond

Vegetatie kan luchtverontreiniging op twee manieren beïnvloeden:

a. Filtering

Dit is het afvangen van verontreinigende componenten als fijn stof en stikstofdioxide door de vegetatie. Gassen worden vooral via huidmondjes van bladeren opgenomen (zie bijvoorbeeld Fowler, 2002). Loofbomen zijn daarin efficiënter dan coniferen. Deze absorptie geschiedt niet in gelijke mate: gevonden is dat de opname van CO door vegetatie veel kleiner dan die van NO₂. Echter, dit is minder rechtlijnig dan het lijkt. Bijvoorbeeld: door de toegenomen menging en een langere verblijftijd in de vegetatie kan NO meer reageren met ozon wat een verhogend effect kan hebben op de NO₂-vorming in en achter de strook. Kleine stofdeeltjes worden niet opgenomen maar deponeren op bladeren en andere plantendelen en verblijven daar tijdelijk (adsorptie). Coniferen doen dit weer beter dan loofbomen wat o.a. komt door optredende turbulentie rondom de spitse naalden. Naar verwachting is de mate van filtering verschillend voor deeltjes met verschillende diameter: grotere deeltjes zullen eerder adsorberen aan vegetatie dan kleinere deeltjes. Dit geldt dan met name voor deeltjes groter dan 1 µm.

b. Veranderingen in windveld

Als gevolg van de obstructie neemt de inkomende windsnelheid af voor de vegetatiestrook. Er ontstaat een verticaal omhoog gerichte windcomponent en een deel van de stroming wordt over het groenelement gebogen. Het andere deel gaat door de vegetatie heen. De gemiddelde snelheid van de luchtstroom in en achter de vegetatie zal lager zijn dan in een situatie zonder groenelement. Indien de (verkeers-)emissie dichtbij de vegetatie plaatsvindt, zal het grootste deel door de vegetatie gaan. De concentraties in de vegetatie en daarachter zullen dan omhoog gaan in vergelijking met een situatie zonder groenelement. De lagere windsnelheid leidt namelijk tot minder menging van dezelfde emissies.

Een tweede verandering in het windveld ontstaat doordat een obstakel een lange golf van neerwaartse turbulentie achter het obstakel creëert. Hierdoor vindt inmenging van lucht van boven plaats (Ries en Eichhorn, 2001). Daarin bevindt zich naar verwachting een deel van de verkeersemmissies afkomstig van de weg die over het obstakel is gebogen maar ook (mogelijk schonere) lucht uit hogere luchtlagen. Door de neerwaartse beweging zal dit op zekere afstand van de vegetatie een verandering van de concentraties op leefhoogte kunnen geven. Ook hier is op voorhand niet aan te geven of dit een positieve of negatieve verandering zal zijn.

De mate waarin de concentraties veranderen wordt dus bepaald door de nabijheid van de verkeersemmissies, de snelheidsdemping door het groenelement, de depositie van verontreiniging in de vegetatie, en een veranderd turbulentieveld achter de vegetatiestrook. Het netto resultaat is op voorhand niet te voorspellen (en naar verwachting ook nog sterk afhankelijk van de kenmerken van locatie en vegetatie).

4. Meetopzet

4.1 Locatie en Vegetatie

Op voorhand is aan de locatie bepaalde eigenschappen opgelegd:

1. bestaande beplanting
2. hoogte groenstrook maximaal 10-12 m
3. voldoende afstand tussen weg en vegetatie voor plaatsing apparatuur
4. voldoende verkeersintensiteit
5. vergelijkbaar wegvak zonder vegetatie
6. weg nagenoeg recht
7. bermen en nabijgelegen gronden toegankelijk
8. bovenwinds gebied vrij van obstakels en andere bronnen
9. bovenwinds gebied vergelijkbaar voor wegvak met en zonder vegetatie
10. voldoende frequentie van optreden vereiste windrichting

Deze eisen zijn o.a. bedoeld om het voorziene effect zo groot mogelijk te maken. Het is belangrijk in dit verband om op te merken dat het bestaande vegetatie betreft waaraan geen aanpassingen zijn verricht die het effect kunnen vergroten. Er is nog een aantal andere eisen te formuleren maar deze hebben vooral betrekking op de praktische uitvoerbaarheid en worden verder niet besproken. Op basis hiervan en in samenspraak met IPL, ES Consulting en Rijkswaterstaat (Directie Oost) is uiteindelijk gekozen voor de locatie langs de A50 nabij Vaassen. De beschrijving van ES Consulting van deze locatie is te vinden Bijlage I. Een bovenaanzicht is hieronder te zien.



Figuur 4.1 Meetlocatie langs de A50 nabij Vaassen: referentielijn (nabij hectometerpaal 216.6) en vegetatielijn (tussen hmp. 216.8 en 216.9)

Het gedeelte waar géén vegetatie aanwezig is en het gedeelte mét vegetatiestrook sluiten op elkaar aan. Afgezien van de vegetatie zijn er geen andere verschillen die invloed hebben op de verspreiding van de verkeersemissies en op de concentraties langs de weg. Het beschouwde wegdeel is recht. De oriëntatie is vrijwel Noord-Zuid (170° - 350°). De verkeersintensiteit is 60.300 voertuigen per etmaal met een fractie vrachtverkeer van 17%. Onderstaande foto's geven een indruk van de situatie op de grond.



Figuur 4.2 Foto's van de meetlocatie langs de A50
 a) vegetatiestrook in noordelijke richting
 b) referentie; in zuidelijke richting
 c) meetopstelling
 d) meetopstelling
 e) impressie van bovenwindse deel
 f) detail vegetatie

De karakteristieken van de vegetatie zijn:

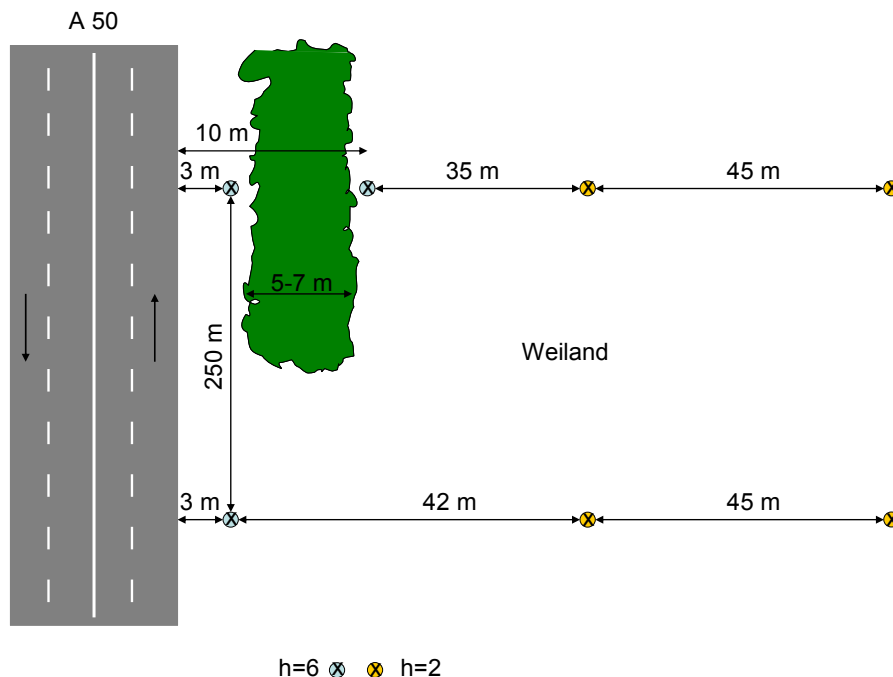
- hoogte H 9-11 m
- breedte 6-7 m
- lengte enkele honderden meters.
- afstand de wegrand 3-4 m
- dichtheid vegetatie tamelijk dicht
- positie t.o.v. weg oostkant van de weg
- porositeit 30-40%, bij winddruk 40-50%
- gemengde vegetatie wilgen, eiken, witte elzen, bramenstruiken. sleedoorn

Voor meer details wordt verwezen naar het rapport van ES Consulting (2006).

Het jaargemiddelde verloop van de NO₂ en PM₁₀ concentraties op deze locatie is berekend met het VLW model en te zien in Figuur A.1 (Bijlage A).

4.2 Experimentele opstelling

De meetopstelling is schematisch weergegeven in Figuur 4.3.



Figuur 4.3 Meetopstelling (niet op schaal)

De vegetatielijn kent 4 meetpunten:

- voor de vegetatie op 3 m afstand van wegrand
- achter de vegetatie op 10 m van de wegrand
- op 45 en 90 m van de wegrand

De referentielijn kent 3 meetpunten:

- op 3 m van de wegrand
- op 45 en 90 m van de wegrand

Windsnelheidsmetingen

Vegetatielijn: voor en achter de vegetatie zijn de metingen uitgevoerd met sonische anemometers (6 m) en Mierij windsensoren (3 m). De sonische anemometers meten naast de horizontale componenten ook de verticale component van de windvector¹. De Mierij registreert de (horizontale) windsnelheid en -richting. Deze apparatuur is ook gebruikt op de twee meetpunten verder benedenwinds (op 45 en 90 m).

Referentielijn: op 3 m afstand van de wegrand, en op 45 en 90 m bevinden zich identieke opstellingen als op de vegetatielijn.

Concentratieingen

De volgende componenten zijn gemeten:

- NO en NO₂
- fijn stof (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁)
- CO₂

Vegetatielijn: gasconcentratieingen geschieden op dezelfde punten als de windmetingen d.w.z. voor en achter de strook op twee hoogtes (6 m resp. 2 m) en op de twee punten verder benedenwinds (2 m).

Referentielijn: gelijk aan de vegetatielijn maar nu voor de drie meetpunten.

Op de twee meetlijnen is identieke meetapparatuur ingezet teneinde verschillen in instrumentatie zoveel mogelijk uit te sluiten. In geval van de gasmetingen zijn de punten op 1 meetlijn bemonsterd met 1 apparaat dat via een kleppensysteem schakelt van het ene meetpunt naar het andere. De metingen m.b.t. fijn stof voor de strook zijn uitgevoerd met een stationaire opstelling. De metingen op de vegetatielijn en op de referentielijn zijn gedaan met een verplaatsbare opstelling. Voor uitleg over meetapparatuur, technische aspecten, calibraties en vergelijkingsmetingen wordt verwezen naar Bijlage B.

De reden om CO₂ te meten is de volgende: de bijdrage van het verkeer is relatief beperkt ten opzichte van het achtergrondniveau (slechts enkele procenten). Aangenomen mag daarom worden dat de CO₂ goed gemengd is in de naar de vegetatie toestromende lucht en dat er geen dichtheidsverschillen zijn met de hoogte. Een snelheidsdemping ten gevolge van het groenelement heeft dan geen effect meer op de concentraties achter het element. Een afname in de concentratie achter de vegetatie kan dan alleen veroorzaakt worden door het opname door de vegetatie (zie ook Wesseling et al, 2004). weghalen??

De meetperiode was van begin augustus tot half oktober. Volgens de klimatologie van het KNMI-station Deelen ligt de windrichting ca. 29% van de tijd binnen de gewenste sector Zuidwest-Noordwest. De gunstigste windrichtingen liggen tussen 215° en 305°. De metingen vonden alleen plaats onder droge omstandigheden. Redenen hiervoor zijn de sterke afname van de bijdrage van opwaaiend wegenstof alsmede de (on)begaanbaarheid van het terrein bij veel neerslag.

Het (gemiddelde) verschil in gemeten concentraties op de referentie- en vegetatielijn is voor de verschillende tijdreeksen getest op statistische significantie (p-waarde: 0,05) Voor meer uitleg hierover wordt verwezen naar Bijlage C.

¹ In de oorspronkelijke gedefinieerde meetopzet was gekozen voor masten van 12 m zodat de gehele vegetatie in de hoogte werd "bestreken". De verantwoordelijke dienst van Rijkswaterstaat gaf hiervoor (uiteindelijk) geen toestemming.

5. Resultaten en Discussie

5.1 Inleiding

De doorlooptijd van de hier gepresenteerde metingen is ca. 1 augustus - ca. 15 oktober. Eind oktober vielen de eerste bladeren. De locatie nabij Vaassen was mede gekozen vanwege het relatief gunstige windregiem. Dit jaar was duidelijk afwijkend. Opmerkelijk was dat er geen enkele echt koude dag voorkwam; vrijwel continu lag de temperatuur (ver) boven het langjarige gemiddelde. Dat kwam doordat de heersende stroming een hardnekkige zuidcomponent had waarmee zachte lucht werd aangevoerd. Dit was met name in de maanden september en oktober het geval. Daarnaast had het nog relatief warme water van de Noordzee invloed op de temperatuur en neerslag. Zo viel er in de maand augustus op 22 dagen neerslag. Dat was een nawee van de zeer warme zomer in 2006. Het totaal aan dagen met een gunstige windrichting zonder neerslag kwam hiermee op 7. Voor een overzicht met meer gegevens over deze dagen zie Tabel D.1 in Bijlage D. Uiteindelijk is op een vijftal dagen metingen verricht. De windsnelheid tijdens deze dagen was betrekkelijk laag (max. 4.5 m/s); op 2 dagen was deze zelfs minder dan 2 m/s. De keuze van de locatie (oosten van het land en de windopwaarts liggende Veluwe) speelt hierin mee. Een geringe windsnelheid van de aanstromende lucht is geschikt voor bestudering van het directe effect van de vegetatie, er is immers meer 'tijd' voor opname en adsorptie. Door de vele neerslag was de grond tijdens de meetdagen vochtig. Aangenomen mag daarom worden dat de stand van de huidmondjes maximaal open is geweest.

In de volgende paragrafen zijn grafisch het verloop van de windsnelheid, gascomponenten (NO , NO_2 , CO_2) en fijn stof (PM_{10} en $\text{PM}_{2.5}$) op de vegetatielijn en - ter vergelijking - de referentielijn weergegeven. Voor dit overzicht is de daggemiddelde waarde (snelheid, concentratie) per meetpunt geschaald met de waarde gemeten op het meetpunt voor de vegetatiestrook (3 m van de wegrand). Vervolgens is het gewogen gemiddelde berekend over de beschikbare meetdagen. De weegfactor is het aantal metingen op een meetpunt.

5.2 Windsnelheid

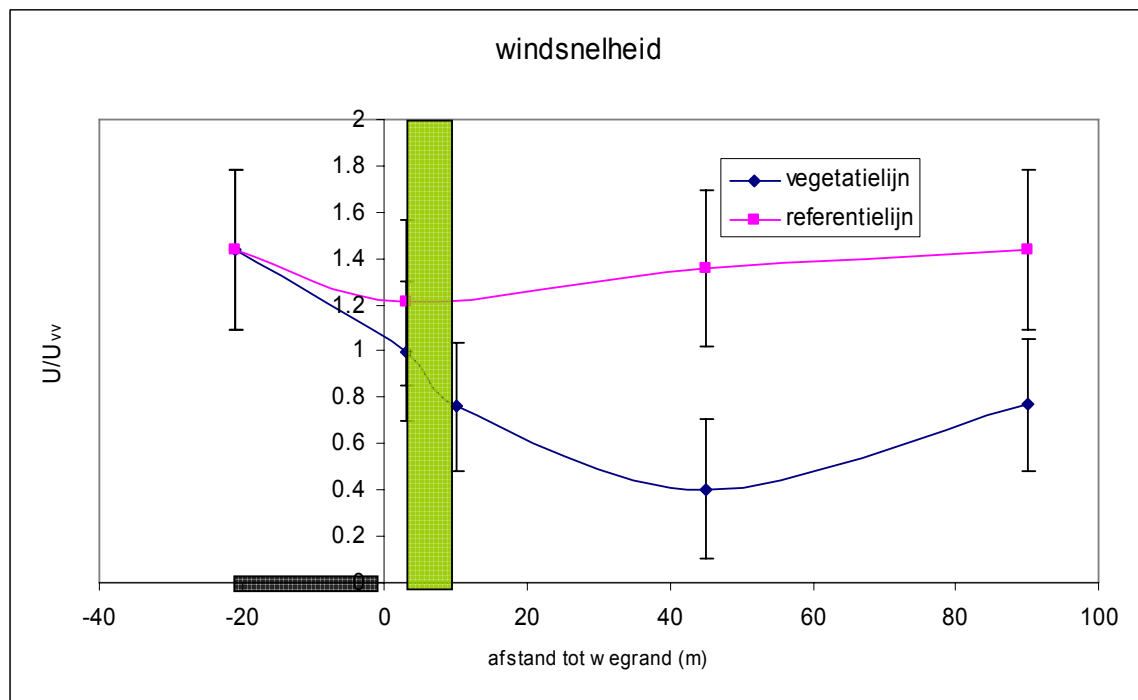
In Figuur 5.1 is het verloop van de windsnelheid afgebeeld voor de vegetatielijn en referentielijn. De gemiddelde windsnelheid voor de vegetatiestrook is 2 m/s. De windsnelheid bovenwinds (op -20 m) is ca. 3 m/s; hiervoor is de waarde op het 90-m meetpunt van de referentielijn genomen.

De vegetatiestrook veroorzaakt volgens verwachting benedenwinds een rustiger windklimaat. Er is een lagere snelheid van de wind voor, in en achter de strook. De afname van de windsnelheid voor de vegetatie door de stuwing is 18% ten opzichte van de windsnelheid op het referentiepunt (op dezelfde afstand van de wegrand). Direct achter de strook is de windsterkte een kleine 25% lager dan vlak voor de strook. Verder windafwaarts bereikt de windsnelheid een minimum op het meetpunt op 35 m van de vegetatiestrook (dit is ongeveer 3,5 keer de obstakelhoogte H). Op dit punt heeft de wind met ca. 60-70% aan snelheid ingeboet ten opzichte van de achtergrondwind. Dit lijkt aan de hoge kant bij de gegeven porositeit (zie bijv. Sturrock, 1972) maar bedacht moet worden dat de snelheidsdemping ook het effect van het voorbijrijdende verkeer bevat. Uit het verloop van de windsnelheid langs de referentielijn blijkt namelijk dat het voorbijrijdende verkeer al een meetbare afname (17%) van de windsnelheid veroorzaakt (Figuur 5.1).

Op het meetpunt op 90 m van de weg (ongeveer 8,5-9 maal de hoogte H van de vegetatie) is de windsterkte nog niet terug op achtergrondniveau. Kennelijk werkt de verzwakking van het

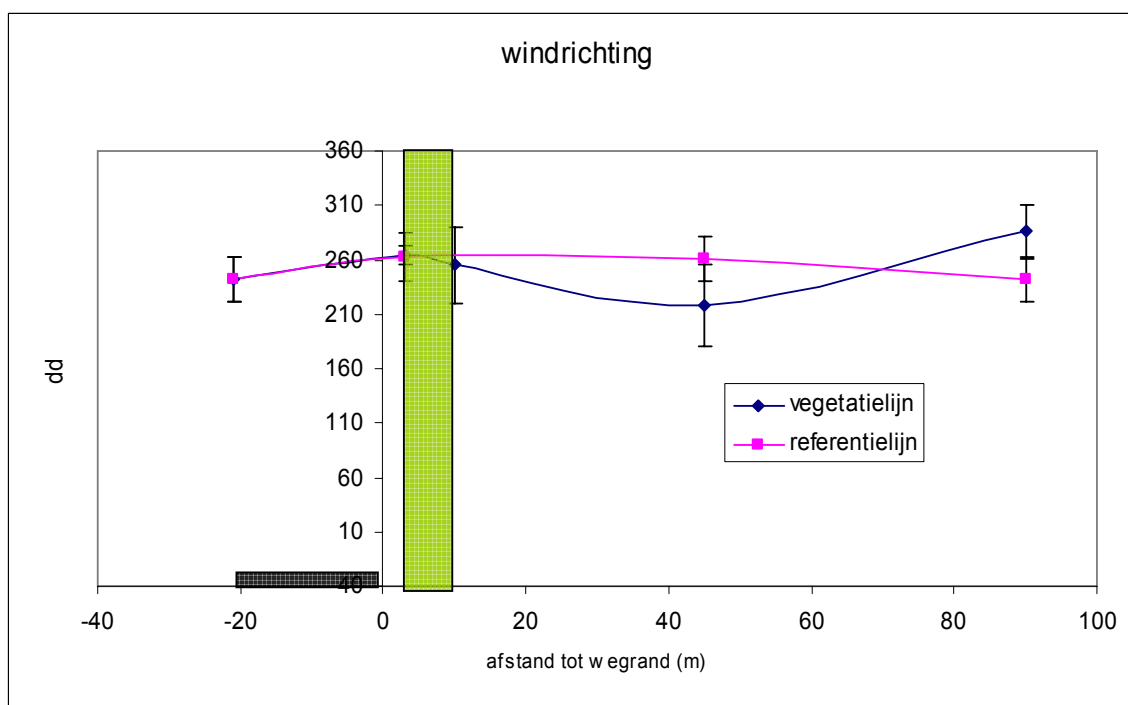
windveld door tot voorbij dit punt. Achter een obstakel moet lucht naar beneden stromen, er heerst daar een onderdruk. Het drukverschil is het grootst achter een massief obstakel wat betekent dat de aanvulling van het snelheidstekort vanuit de hogere luchtlagen sneller plaats vindt dan bij een poreuzer obstakel. Het zogenaamde zogebied van een obstakel is dus relatief langer naarmate het obstakel zelf poreuzer is. Wieringa en Rijkoort (1983) geven aan voor een waarnemingshoogte van $0,5H$ dat het gebied met minder dan 80% van de ongestoorde windsnelheid zich wel tot ca $15H$ kan uitstrekken bij een vrij poreus windscherm.

De relatie tussen de windsnelheden op de diverse meetpunten is te zien in Figuur 5.3. Het sterkst is het verband op de meetpunten langs de referentielijn. De relatie tussen de metingen vlak voor en achter is eveneens herkenbaar, deze zijn wel 'gedrukt' in waarde en variabiliteit. De grootste veranderingen van de windsnelheid worden gevonden verder weg van de strook op 45 respectievelijk 90 m.



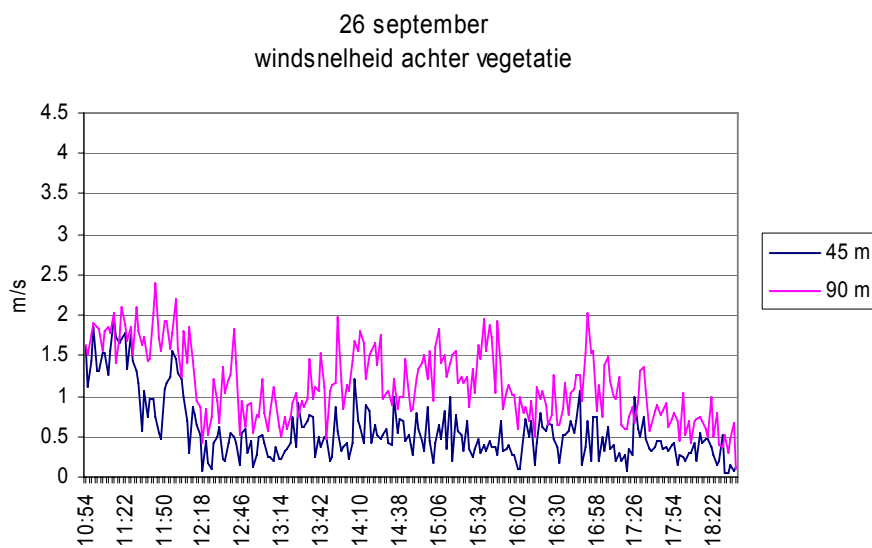
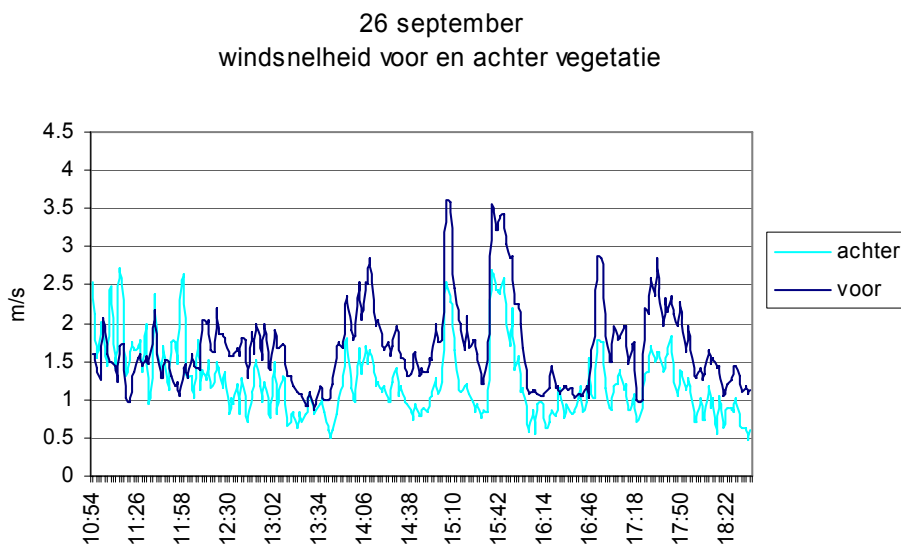
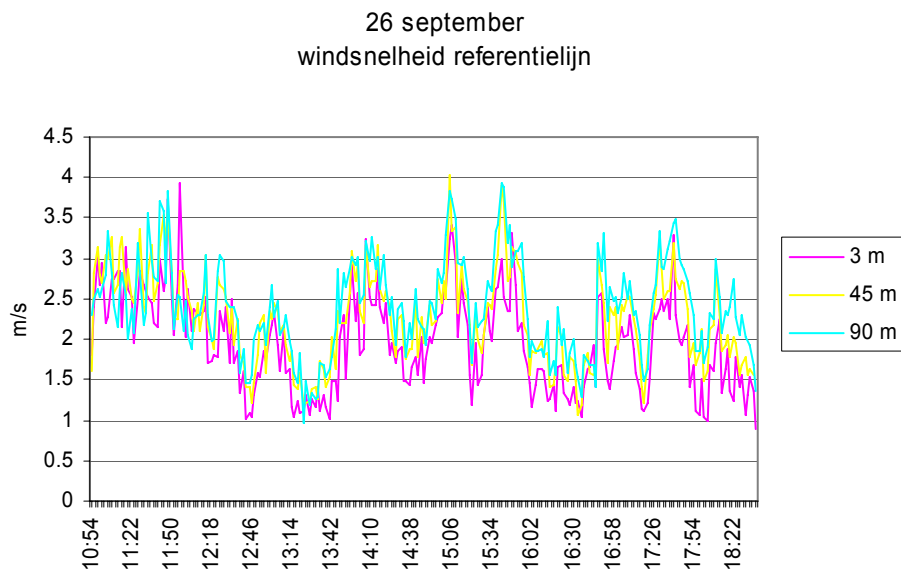
Figuur 5.1 Verloop windsnelheid; U_{vv} is windsnelheid gemeten vlak voor de vegetatie

De gemiddelde windrichting op de meetpunten op 3 m van de weg is ongeveer 260° (zie Figuur 5.2). Achter de strook (op 45 m van de wegrand) lijkt de wind te krimpen ofwel komt meer uit een zuidelijke richting terwijl op 90 m juist sprake is van een ruiming. Normaal is dat de wind ruimt met de hoogte (onder niet al te instabiele omstandigheden). Inmenging van lucht van boven zou dan moeten leiden tot (enige) ruiming dicht bij de grond. Op het achterste meetpunt lijkt dit inderdaad het geval te zijn.



Figuur 5.2 *Verloop windrichting (dd)*

Voor verdere resultaten met betrekking tot de windmetingen zie Bijlage E.



Figuur 5.3 Windsnelheden gemeten langs referentielijn op 3, 45 en 90 m van de snelweg, voor en achter de vegetatiestrook en op 45 en 90 m achter de vegetatie(meethoogte 3 m)

5.3 Gascomponenten

In de Figuur 5.4 en Figuur 5.5 is het (gewogen) gemiddelde verloop van de NO en NO₂ concentraties afgebeeld voor en achter de vegetatie en op de referentielijn (meethoogte 2 m). De concentraties zijn geschaald met de (gemiddelde) waarde op het meetpunt vlak voor de vegetatie op 3 m van de wegrand (NO: 125 µg/m³; NO₂: 110 µg/m³). In Figuur 5.6 is het verloop van de CO₂-concentraties te zien (concentratie op 3 m van de wegrand: 390 ppm).

Filterend effect

Het groenelement heeft een (licht) verhogend effect op de concentraties voor (wegzijde) en achter de strook in vergelijking met de ongestoorde situatie. De toename voor de strook is 3-5% ten opzichte van de concentratie op het referentiemeetpunt (zie Figuur 4.3). Direct *achter* de strook is de concentratie niet afgenomen ten opzichte van ervoor. Dit impliceert een verdere stijging ten opzichte van de concentraties gemeten in de situatie zonder vegetatiestrook: vlak achter de strook blijkt dit verschil het hoogst, ca. 10%. Op de referentielijn (de 'ongestoorde' situatie) zorgt verdunning voor verdere afname in concentraties. Dit beeld keert in meer of minder mate terug op elke meetdag en ook op 6 m hoogte. Het resultaat per meetdag is te vinden in Bijlage F.

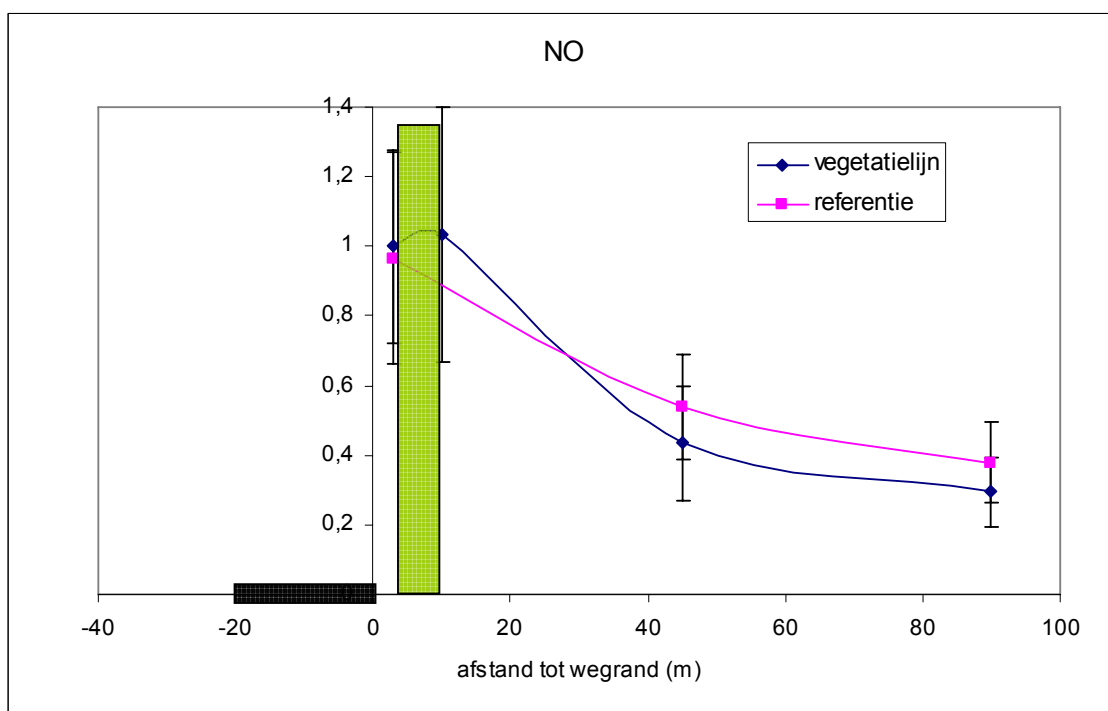
Voor CO₂ wordt direct achter de strook evenmin een afname geconstateerd in vergelijking met voor de strook. Ofschoon aannemelijk is dat de vegetatie hier CO₂ opneemt, is het effect bij de gegeven concentraties kennelijk niet groot genoeg dat het meetbaar wordt achter de vegetatie.

Bij de keuze voor deze locatie is in aanmerking genomen dat de strook voldoende doorlaatbaarheid bezit zodat een afdoend contact met het groen mogelijk is. Als gevolg van de aanwezigheid van de vegetatiestrook neemt de inkomende snelheid af en is sprake van lagere gemiddelde snelheden in en achter de strook in vergelijking met de situatie zonder vegetatiestrook. Gezien de afstand tussen wegrand en vegetatie (3 m) is het aannemelijk dat de verkeersemmissies grotendeels door de strook gaan (in plaats van erover). De gemeten concentraties direct achter de strook aan NO en NO₂ zijn het resultaat van enerzijds opname door vegetatie en anderzijds de verminderde verdunning. De concentraties gemeten direct achter de strook wijken niet duidelijk af van vlak ervoor. Dit is geconstateerd op alle meetdagen (5). Conclusie hier is dat een gunstig effect van opname van gassen in de vegetatiestrook *niet* is aangetoond. Het is (onder de gegeven omstandigheden) kennelijk niet zodanig sterk dat het de concentratieverhoging (veroorzaakt door de afname in verdunning) kan compenseren.

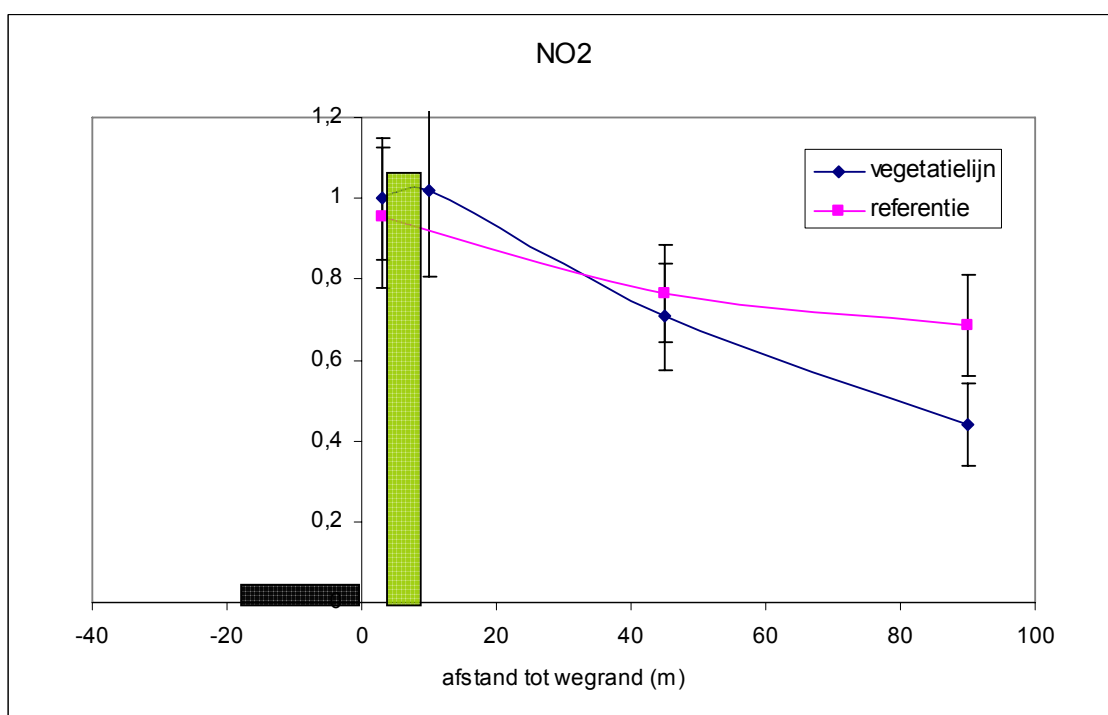
Effect op grotere afstand van de strook

De gelijktijdige gradiëntmetingen suggereren, na de aanvankelijke toename direct achter de strook, lagere niveaus voor de gascomponenten op grotere afstand (in vergelijking met de referentiemetingen. Voor NO en NO₂ is dit zichtbaar vanaf ca. 30 m van de weg. Voor NO₂ blijkt het verschil statistisch significant op 90 m afstand (zie Bijlage G). Gemiddeld over de afstand 45-90 m is het niveau ca. 20% lager dan langs de referentielijn.

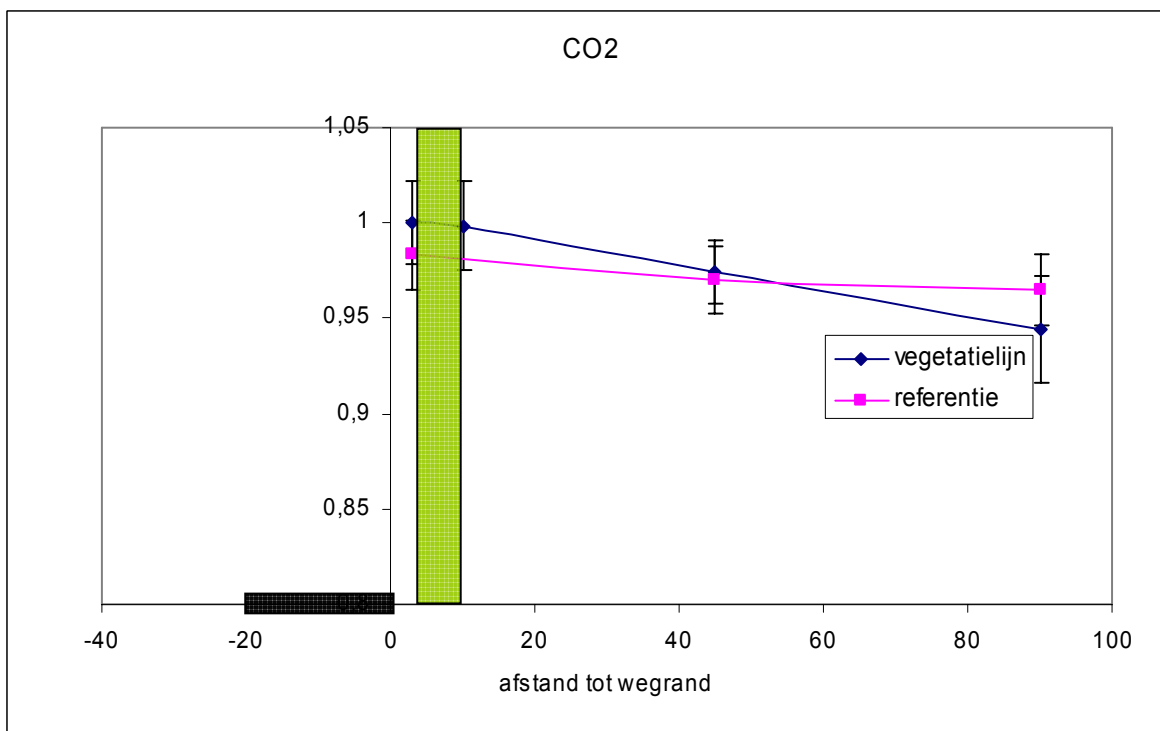
De aanwezigheid van een poreuze strook creëert (net als bij een gebouw) windafwaarts een golf met neerwaartse turbulentie tot op grote afstand van de vegetatiestrook. Achter de vegetatiestrook neemt de wind dus niet alleen af, er komt een neerwaartse luchtstroom bij. Deze neergaande luchtstroom begint in de bomentop en bereikt pas op grotere afstand van de strook de grond. Een deel van de luchtstroming zal omhoog worden gestuwd bij nadering van de vegetatie (boven de strook is dan ook sprake van hogere snelheden). Deze lucht bevat grotendeels verkeersemmissies. Door de toegenomen verticale uitwisseling is het denkbaar dat er meer inmenging plaatsvindt met (mogelijk schonere) lucht uit hogere luchtlagen dan zonder strook het geval is. De neergaande beweging achter de strook zorgt ervoor dat deze lucht uiteindelijk op leefniveau terechtkomt. Dit kan een verklaring zijn voor de lagere concentraties op grotere afstand van de vegetatiestrook (ten opzichte van de situatie zonder strook).



Figuur 5.4 Concentratiegradiënt NO



Figuur 5.5 Concentratiegradiënt NO₂



Figuur 5.6 Concentratiegradiënt CO_2

5.4 Fijn stof

In Figuur 5.7 is het (gewogen) gemiddelde verloop van de fijnstofconcentraties (PM_{10} , $PM_{2,5}$ en PM_1) afgebeeld voor en achter de vegetatie, en voor de situatie zonder vegetatie ('referentielijn'). De meetafstanden zijn 3 m van de wegrand (vlak voor de vegetatie), 10 m van de wegrand (vlak na de vegetatie) en op 20 m, 45 m en 90 m van de wegrand. Voor de referentielijn zijn metingen op 3 m, 20 m en 45 m beschikbaar. De concentraties zijn geschaald met de (gemiddelde) waarde op het meetpunt vlak voor de vegetatie op 3 m van de wegrand.

Filterend effect

De fijnstofniveaus voor PM_{10} , $PM_{2,5}$ en PM_1 zijn direct achter de vegetatie lager dan die gemeten vlak voor de vegetatie. Het verschil blijkt het grootst voor PM_{10} en het kleinst voor PM_1 . Dit klopt met de verwachting dat de grootste deeltjes het meest zullen worden tegengehouden. Anders dan bij de gascomponenten is het netto resultaat van de verminderde verdunning en afvangst door vegetatie aanzienlijk beter.

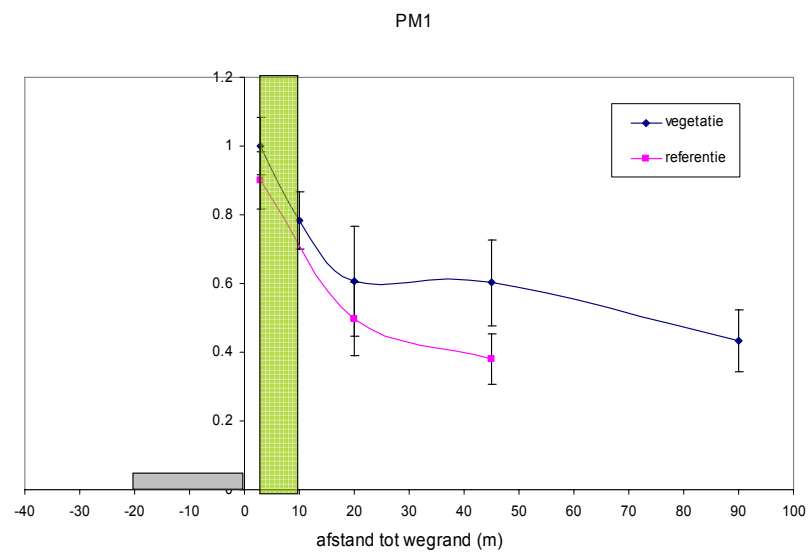
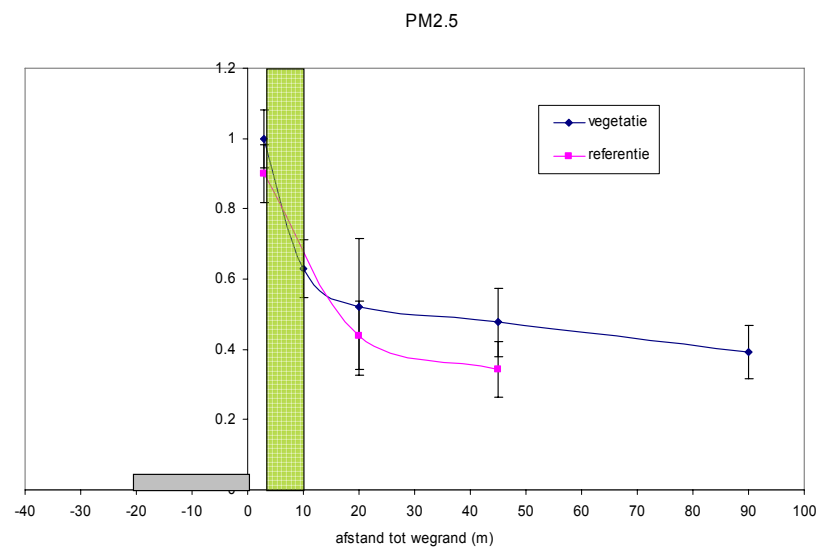
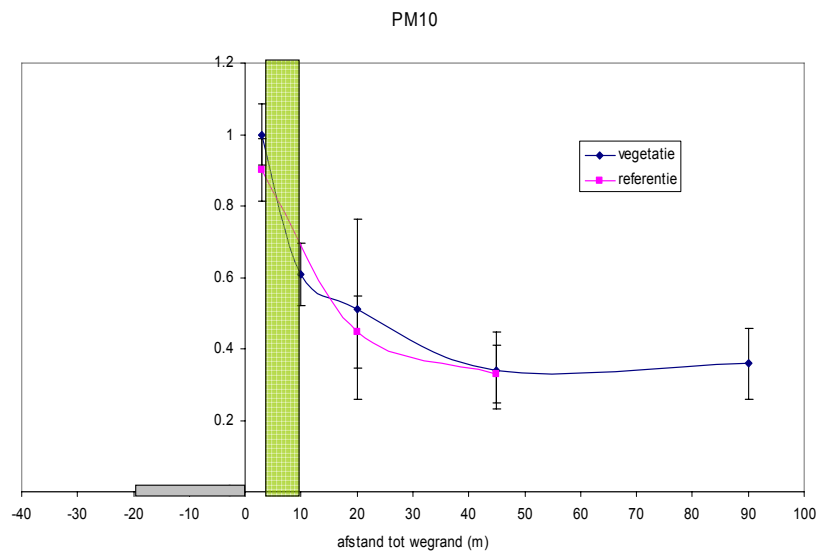
Voor PM_{10} en $PM_{2,5}$ verloopt de afname sneller dan de (geïnterpoleerde) daling van deze fracties op de referentielijn (de situatie zonder vegetatie). Omdat de gemeten concentraties voor de vegetatiestrook door stuwings hoger zijn (ca. 10%) dan die gemeten op de referentielijn (op dezelfde afstand van de wegrand (3 m)) bedraagt het verschil vlak achter de vegetatie met de referentielijn (op 10 m van de wegrand) voor PM_{10} niet meer dan ca. 10%. Dit verschil neemt af met de deeltjesgrootte. Zo is de daling in de vegetatie voor PM_1 niet voldoende om onder het referentieniveau te komen.

Het is aannemelijk dat het gedrag van PM_1 vooral bepaald wordt door de luchtbewegingen (verdunning). Voor deze stoffractie wordt weinig verlies verwacht door adsorptie aan vegetatie of depositie naar de bodem. Door de PM_{10} - en $PM_{2,5}$ -fracties te delen door de PM_1 -fractie (normeren) zowel voor de referentie- als voor de vegetatielijn, kan het verlies aan $PM_{2,5}$ en PM_{10} door adsorptie en depositie zichtbaar gemaakt worden; het resultaat hiervan is te zien in Figuur H.1 (Bijlage H). Berekend wordt dat de afname 17% is voor $PM_{2,5}$ en 20% voor PM_{10} . De

afname voor grotere deeltjes is weliswaar meer dan voor kleinere deeltjes maar de onzekerheden hierin zijn aanzienlijk. De conclusie is wel dat er fijn stof in de vegetatie achterblijft. Regionaal gezien heeft vegetatie dus een positieve invloed op de fijnstofconcentraties.

Effect op grotere afstand van de strook

Er zijn geen referentiemetingen beschikbaar op 90 m afstand van de weg. De concentraties van PM_{10} op de vegetatielijn zijn (tot 45 m) ongeveer gelijk aan die op de referentielijn. De afname van PM_{10} achter de vegetatie (tot 45 m) verloopt sneller dan die voor PM_1 ($PM_{2.5}$ zit er ruwweg tussenin; zie ook Figuur H.1). De verklaring voor de extra daling van PM_{10} kan zijn dat de depositie van het grove deel van PM_{10} in het gebied met lagere horizontale windsnelheid: er is namelijk meer tijd voor uitzakken met vegetatie dan zonder vegetatie. De te verwachten extra depositie door windluwte is bij 1 tot 2 m/s 5 tot 10% voor deeltjes met een diameter rond 10 μm .



Figuur 5.7 Gemeten verloop van de concentraties voor de verschillende fijnstoffracties

6. Samenvattende conclusies

De effecten van 'groenelementen' op de luchtkwaliteit rondom (snel-)wegen zijn niet eerder onderzocht. Dat is niet zo verbazingwekkend. Er is namelijk sprake van een complexe situatie waarin allerlei factoren de concentratieniveaus beïnvloeden. Belangrijk zijn daarbij soort en kenmerken van het 'groen' (loof- of naaldbomen, struiken, hoogte, diepte, porositeit), afstand tot de weg (emissies vlakbij de strook of verderweg), grootte en samenstelling verkeersemissies, lokale meteorologie, etc.. Bekend is dat vegetatie verontreiniging uit de lucht kan filteren. Met behulp van eenvoudige modellen is dit directe effect (d.w.z. opname c.q. adsorptie) van doorlatende groenelementen op de concentraties van NO₂ en fijn stof nader beschreven (Wesseling et al., 2004). De conclusie van deze studie was dat onder gemiddelde meteorologische omstandigheden groenelementen in het gunstigste geval 20% van PM₁₀ kunnen afvangen en dat de NO₂ reductie maximaal 10% zou bedragen. De vraag is nu of dergelijke voorspelde effecten in de praktijk ook daadwerkelijk meetbaar zijn.

Filterend effect

Bij de keuze voor de meetlocatie nabij Vaassen is in aanmerking genomen dat de vegetatiestrook voldoende doorlaatbaarheid bezit zodat de luchtstroom een afdoend contact met het groen heeft (ES Consulting 2006). Er moet nu onderscheid gemaakt worden tussen twee effecten. Als gevolg van de aanwezigheid van de poreuze vegetatiestrook neemt de inkomende snelheid af. Dit leidt tot een lagere gemiddelde windsnelheid in en achter de strook zoals beschreven. Gezien de afstand tussen wegrand en vegetatie (3 m) is het aannemelijk dat de geëmitteerde stoffen grotendeels door de strook gaan in plaats van eroverheen. De concentraties achter de strook gaan dan omhoog omdat dezelfde emissies worden met minder langsstromende lucht gemengd (in vergelijking met de situatie zonder strook). Als in de vegetatiestrook opname van verontreiniging plaatsvindt, zal dit de concentratie achter de strook doen afnemen. Het *netto* effect op de luchtkwaliteit direct achter de strook wordt dus bepaald door opname/adsorptie en snelheidsdemping (voor meer discussie zie Wesseling et al., 2004).

Conclusie op basis van de hier gepresenteerde metingen is dat er direct achter de vegetatie geen sprake is van lagere gasconcentraties in vergelijking met de concentraties gemeten voor de vegetatie en die gemeten worden in de situatie zonder vegetatie. Dit betekent overigens *niet* dat het filterend effect niet plaatsvindt maar kennelijk is dit effect niet zodanig groot dat het de optredende concentratieverhoging veroorzaakt door de lagere windsnelheden in absolute waarde overtreft. De hier gepresenteerde fijnstofmetingen uitgevoerd direct voor en achter de vegetatie wijzen wel op een afname van PM₁₀ (ca. 20%) en van PM_{2.5} (ca. 17%). Het netto effect van adsorptie en afname windsnelheid is in dit geval positief.

Effect op grotere afstand van de strook

De aanwezigheid van een (poreus) obstakel zal ook de concentraties verder weg van de strook beïnvloeden. Bij het naderen van de vegetatie zal een deel van de luchtstroming omhoog worden gestuwd en boven de strook is dan ook sprake van hogere snelheden. Afhankelijk van de afstand tot de weg zal dus een deel van de verkeersemissie over het obstakel worden geduwd. Voorbij de strook ontstaat een neergaande verticale luchtbeweging. Dit betekent vertikaal transport van lucht die over het obstakel heen is geduwd en mogelijk vermengd is geraakt met lucht afkomstig uit hogere luchtlagen door de toegenomen verticale turbulentie. Deze lucht van boven kan relatief schoon zijn. Een dergelijke inmenging kan de lagere concentraties verklaren voor met name NO₂ (ten opzichte van de situatie zonder strook) gemeten op grotere afstand van de strook (vanaf ca 30 m) ten opzichte van de situatie zonder strook. Deze afname bedraagt ongeveer 20%. De onzekerheden zijn echter groot en verder onderzoek is noodzakelijk.

Overweging

Belangrijk met betrekking tot deze studie is de vraag wat nu consequentie zou zijn van een afname van (bijvoorbeeld) 20% op de jaargemiddelde concentraties in de omgeving van de vegetatiestrook. Voor een schatting hiervan gaan wordt uitgegaan van de meest gunstige situatie ('best-case scenario'). Dat wil zeggen:

- a. de oriëntatie van de snelweg (en vegetatiestrook) is zuidoost-noordwest zodat de windsector met de hoogste frequentie van optreden (Zuidwest) optimaal is. De sector zelf is breed gekozen (120° , ofwel $\pm 60^\circ$ ten opzichte van de normaal op de wegrichting). Volgens de klimatologie van het KNMI station in De Bilt geldt dan dat in 47% van de tijd de windrichting binnen deze sector ligt.
- b. de gunstige windrichtingen treden alleen in het zomerseizoen op zodat het effect van de vegetatie optimaal is. Op basis van het gevonden meetresultaat zou dan gedurende 170 dagen sprake zijn van een verlaging met 20% (vergeleken met de situatie zonder vegetatie). Bij een jaargemiddelde concentratie voor NO_2 van $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figuur D.1 in Bijlage D) zou het nieuwe jaargemiddelde (onder invloed van een vegetatiestrook) dan $27,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($=0,53 \cdot 30 + 0,47 \cdot 24$) bedragen, een verlaging derhalve met $2,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In het slechtste geval ('worst-case') is er geen enkel effect. De afname op jaarbasis wordt dus geschat op maximaal $2,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De vraag die vervolgens beantwoord moet worden of dit voldoende perspectief biedt voor het wegnemen van knelpunten langs snelwegen. Het beantwoorden van deze vraag valt buiten het bestek van dit onderzoek. Bovendien is nadere experimentele bevestiging gewenst.

Een tweede overweging in deze is de dagnorm van fijn stof. Overschrijdingsdagen voor PM_{10} treden bijna zonder uitzondering op bij windrichtingen vanuit de sector zuidoost. Gezien de oriëntatie van bovenstaande (optimale) vegetatiestrook zal deze weinig of geen effect hebben, en zelfs kunnen leiden tot een verhoging door obstructie. Zou de vegetatiestrook daarentegen gunstig liggen (oriëntatie zuidwest-noordoost) bij genoemde windrichting, dan zal bij deze doorgaans droge weersomstandigheden sprake zijn van een toename van opwaaiend stof op de (snel)weg. Dit vanwege het niet wegspoelen van allerlei grover materiaal dat door het verkeer gegenereerd wordt, en is er dus plaatselijk een toename zijn van de grove fractie van PM_{10} . Doordat dit deel het best door de vegetatie afgevangen wordt, kan er juist een extra reductie langs de weg plaatsvinden tijdens overschrijdingsdagen. Het effect hiervan zou bij zo'n specifieke situatie apart moeten worden onderzocht na een wat langere periode van droogte. Tijdens het hier beschreven onderzoek heeft zo'n periode zich niet voorgedaan.

Op basis van de uitgevoerde metingen zijn de volgende conclusies te trekken:

Filterend effect

- *Opname van gascomponenten door de vegetatie kon niet worden aangetoond. De gasconcentraties gemeten direct voor en achter de vegetatiestrook zijn niet verschillend.*
- *Wel aantoonbaar is een afname van PM_{10} en $PM_{2.5}$. Uit de verschillen tussen de meetwaarden voor PM_1 en PM_{10} kan geconcludeerd worden dat vooral de grove fractie (PM_{10-1}) wordt "tegengehouden".*

Effect op grotere afstand van de vegetatie

- *De gemeten concentraties van NO_2 op de vegetatielijn blijken (vanaf ca. 30 m) lager te zijn dan die gemeten op dezelfde afstanden langs de referentielijn. Het verschil bedraagt ongeveer 20%. De oorzaak ligt vermoedelijk in een toename van verticale uitwisseling achter het groenelement. Dit verdient nader onderzoek.*
- *Tot ca. 45 m zijn de*
- *concentraties van PM_{10} op de vegetatielijn ongeveer gelijk aan die op de referentielijn.*

Het groenelement bij Vaassen heeft een gunstig effect in de zin dat de vegetatie fijn stof afvangt. De concentraties langs de weg worden er weliswaar niet beter op maar het zal uiteindelijk positief doorwerken op het (regionale) achtergrondniveau.

De metingen zijn in eerste instantie niet bedoeld om het effect op jaargemiddelde concentraties te bepalen. Wanneer toch een schatting gemaakt wordt op basis van het experimentele resultaat voor NO_2 dan blijkt er sprake van een maximale reductie van enkele microgrammen. Mogelijk dat optimalisatie van vegetatiekenmerken verbetering kan brengen.

Referenties

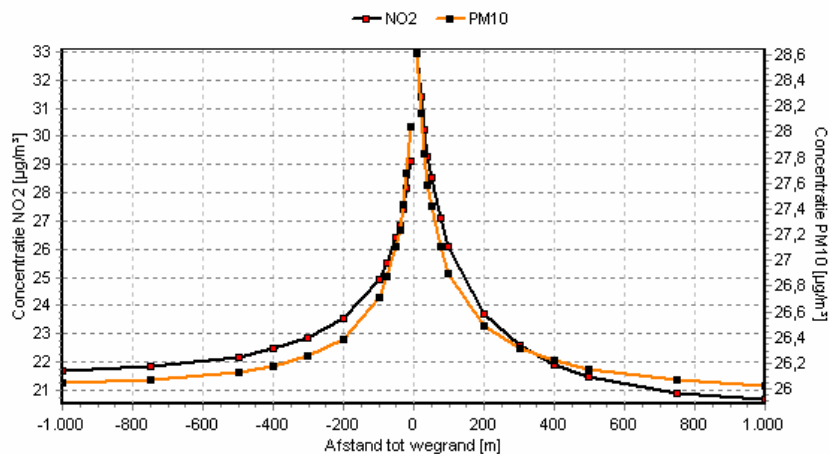
- Brink, H.M. ten, Khlystov, A., Kos, G.P.A., Tuch, T., Roth, C. Kreyling, W. (2000): *A high-flow humidograph for testing the water uptake by ambient aerosol*. Atmospheric Environment 34, 4291-4300.
- DWW/IPL (2007): *Kennisdocument Vegetatie-Luchtkwaliteit ten behoeve van het uitvoeren van een pilotproject langs rijkswegen*. Rapport no. DWW 2006-094/IPL 06.00019.
- ES Consulting (2006): *Effect op luchtkwaliteit van vegetatie op snelwegen*. Inventarisatie meetlocaties t.b.v. zomermeting (voorlopig rapport).
- Fowler, D., (2002): *Pollutant deposition and uptake by vegetation*. In Bell and Treshow (Eds.), Air Pollution and Life, John Wiley and Sons Ltd, England p.43.
- Nowak, D.J. and D.E. Crane: *The Urban Forest Effects (UFORE) Model: quantifying urban forest: structure and functions*. In: Hansen, M. (Ed.) Second International Symposium. USDA Forest Service General Technical Report.
- Ries, K. and J. Eichhorn (2001): *Simulation of effects of vegetation on the dispersion of pollutants in street canyons*. Meteorol. Z. 10, pp. 229-233.
- Schaum Outline Series (1986): *Theory and Problems of Statistics*. McGraw-Hill Book Company, New York, USA.
- Sturrock, J.W. (1969): *Aerodynamic studies of shelterbelts in New Zealand - I*, N.Z.J. Sci. 12, 754.
- Tuch, T., A.Mirme, E. Tamm, J. Heinrich, J. Heyder, P. Brand, C. Roth, H.E. Wichmann, J. Pekkanen and W.G. Kreyling (1999): *Comparison of two particle size spectrometers for ambient aerosol measurements*. Atmos Environ 34:146-169.
- Wieringa, J. en P.J. Rijkoort (1983): *Windklimaat van Nederland*, KNMI.
- Wesselink, J., J. Duyzer, A. Tonneijck, C. van Dijk (2004): *Effecten van groenelementen op NO₂ en PM₁₀ concentraties in de buitenlucht*, TNO rapport R2004/383.

Bijlage A

Bik 2005. Jaargemiddelde concentratie. Weg: R050 km: 216,1

Aantal voertuigen 60293/etmaal; Fractie vracht: 15,9%

NO₂ achtergrond: 20,9 µg/m³ PM₁₀ achtergrond: 25,9 µg/m³



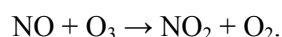
Figuur A.1 Jaargemiddelde concentraties NO₂ en PM₁₀ berekend met het VLW-model (2005) voor de meetlocatie langs de A50 nabij Vaassen.

Uit Figuur A.1 valt af te lezen dat de jaargemiddelde concentraties op 100 m van de wegrand 26,8 µg/m³ voor PM₁₀ en 26,0 µg/m³ voor NO₂ bedragen. Over de benedenwindse afstand van 100 m (gerekend vanaf de wegrand) is de jaargemiddelde daling voor PM₁₀ en NO₂ ongeveer 1,7 µg/m³ respectievelijk 5,3 µg/m³.

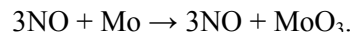
Bijlage B

NO_x monitor

De gebruikte NO_x monitor is de Eco Physics CLD 700 AL. Het is een NO-NO₂-NO_x analyzer van de firma ECO PHYSICS AG, Dürnten, Duitsland en gebaseerd op het principe van chemoluminescentie². Het meetbereik van het instrument is 0-100 ppm. De analyzer is uitgerust met twee kanalen en twee afzonderlijke reactiekamers zodat gelijktijdige metingen van NO en NO_x (NO+NO₂) mogelijk zijn. De NO₂ concentratie wordt berekend door de laatste twee van elkaar af te trekken. NO reageert met ozon (O₃) dat zich in het instrument bevindt:



Deel van het NO₂ raakt in aangeslagen toestand. Bij terugkeer naar de grondtoestand wordt licht uitgezonden met een karakteristieke frequentie. De intensiteit is een maat voor de hoeveelheid NO oorspronkelijk aanwezig in de aangezogen lucht. Dit wordt gemeten met een fotomultiplicator buis. Om NO₂ te meten moet deze gereduceerd worden tot NO. Hiervoor wordt een thermische converter gebruikt:



De calibratie van de gebruikte CLD monitoren met gas standaarden is verricht bij TNO-MEP met een ijkgas met 280 ppb NO en 345 ppb NO₂. Tevens zijn op elke meetdag gedurende minimaal drie kwartier vergelijkingsmetingen uitgevoerd tussen de monitoren die zijn ingezet op de twee meetlijnen. Tijdens deze metingen wordt de apparatuur verbonden met één inlaat.

CO₂ monitor

De gebruikte CO₂ monitor is de LI-6262 CO₂/H₂O Infrarood Spectrometer (LI-COR, Lincoln, USA). De LI-6262 is een zgn. differentiële, 'non dispersive' infrarode (NDIR) meetinstrument. Het meetprincipe is gebaseerd op het verschil in absorptie van infraroodstraling gemeten in een sample cel, waardoor de aangezogen lucht wordt gepompt, en in een referentiecel dat gas met bekende concentratie bevat. Door beide cellen wordt infrarood licht gestuurd. Na het verlaten van de buizen wordt het infrarode licht met behulp van een *beam splitter* gesplitst, zodat het door twee verschillende detectoren (een voor de CO₂ en een voor de H₂O concentratie) kan worden waargenomen. Voor beide detectoren zitten filters, die ervoor zorgen dat er alleen licht wordt doorgelaten met dezelfde golflengte als de absorptiepiek van CO₂. De monitor berekent aan de hand van de absorptiepiek de CO₂ concentratie. Beide detectoren worden via een koeler op een temperatuur van -5°C gehouden om de meting zo stabiel mogelijk te houden. De meetnauwkeurigheid is 1 ppm (bij een concentratie van 350 ppm). Elke meetdag zijn voorafgaande aan de metingen nul- en spancalibraties uitgevoerd. Net als bij de NO_x monitoren zijn op elke meetdag vergelijkingsmetingen uitgevoerd. Voor meer informatie zie de Licor Website [Internet]: <http://ftp.licor.com/env/LI-6262/Manual/LI-6262_Manual.pdf>.

Fijn stof

Het fijn stof is gemeten met een combinatie van Laser Absorption Spectrometer (LAS-X) en de Condensation Particle Counter (CPC). De LAS-X meet deeltjes vanaf 0,1 tot 7,5 µm in 15 grootte klassen. De deeltjes boven de 7,5 µm wordt in een zgn. oversize channel gemeten. De LAS-X data maakt het mogelijk de volume concentratie te bepalen voor elke klasse alsmede de geïntegreerde volume concentratie na sommatie over alle klassen. De massa wordt vervolgens berekend door een representatieve dichtheid of 1,65 g cm⁻³ aan te nemen. Deze waarde is

² Dit is het verschijnsel dat bij een chemische reactie moleculen in aangeslagen toestand geraken. Na verloop van tijd keert een molecuul weer terug naar de grondtoestand waarbij energie vrijkomt in de vorm van licht. De frequentie is specifiek voor de stof die het uitzendt.

gebaseerd op eigen vergelijkingsexperimenten tussen de LAS-X en filtermetingen en in overeenstemming met experimenten van Tuch et al. (1999, zie ook referenties daarin).³ Door te sommeren over de uitkomsten en door het maken van een bepaalde selectie van kanalen kan een afchatting gemaakt worden de verschillende groottefracties (PM_{10} , $PM_{2.5}$ en PM_1). Het eventuele effect van een verhoogde relatieve vochtigheid (bijvoorbeeld optredende rondom de vegetatie) op het meetresultaat van een LAS-X is nader onderzocht door ten Brink (2000). Hierin werd gevonden werd dat het deeltjesgroottespectrum van ‘nat’ aerosol (rel. vochtigheid 87%) identiek is aan dat van ‘droog’ aerosol (rel. vochtigheid 35%). Reden is de combinatie van interne verwarming (door de aanwezige elektronica) en de aanwezigheid van hygroscopische filter cartridges in de LAS-X.

³ Hoewel de precieze waarde van de aerosolendichtheid enigszins kan verschillen van $1,65 \text{ g cm}^{-3}$ is dit niet essentieel in geval van verschilmetingen in concentraties.

Bijlage C

In de statistiek wordt met significantie bedoeld dat een gevonden resultaat (waarschijnlijk) niet op toeval berust. Bij het toetsen van significantie gaat men uit van een nulhypothese die stelt dat een gevonden associatie of verschil berust op toeval, met andere woorden dat er in werkelijkheid geen associatie of verschil bestaat. Met behulp van een statistische toets kan deze hypothese worden getest. Wanneer de gevonden waarde in belangrijke mate afwijkt van de onder de nulhypothese verwachte waarde kunnen we de nulhypothese verwerpen. De gevonden associatie of het gevonden verschil wordt dan statistisch significant genoemd.

De nauwkeurigheid van een statistisch significant resultaat wordt weergegeven door een p-waarde. Strikt genomen is de p-waarde (Eng: probability) een maat voor de kans dat de nulhypothese ten onrechte is verworpen. Praktisch gezien is de p-waarde een waarde tussen 0 en 1, die wordt bepaald door middel van een statistische toets. Bij een p-waarde van 1 kunnen we aannemen dat het gevonden resultaat op toeval berust. Met een p-waarde dichtbij 0 kunnen we ervan uitgaan dat de gevonden waarde een werkelijke associatie aanduidt. Gewoonlijk hanteert men $p=0.05$ als grens van statistische significantie: indien $p < 0,05$ dan is het resultaat significant. Als een resultaat statistisch significant is, hoeft dit niet automatisch in te houden dat het ook van belang is. Het zegt nog niets over de onderliggende oorzaak van een associatie of een verschil. Men mag significant niet verwarren met relevant.

Om vast te stellen of een verschil tussen twee gemiddelden X_1 en X_2 (met standaardafwijkingen σ_1 en σ_2) statistisch significant is in deze studie de volgende criterium gehanteerd:

Indien geldt

$$|X_1 - X_2| \geq 1,96 \sqrt{\sigma_1^2 / n_1 + \sigma_2^2 / n_2} .$$

is het verschil tussen de twee gemiddelden significant (tweezijdige t-toets met p-waarde= 0,05).

Het gewogen (rekenkundig) gemiddelde \bar{X} van n gemiddeldes \bar{X}_i is gedefinieerd als:

$$\bar{X} = \frac{\sum_i^n f_i \bar{X}_i}{\sum_i^n f_i}, \text{ met } f_i \text{ de } i\text{-de weegfactor.}$$

Voor de bijbehorende standaardafwijking σ geldt:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n f_i \sigma_i^2}{\sum_i^n f_i}}, \text{ de wortel uit het gewogen gemiddelde van de variaties.}$$

Zie voor meer informatie (bijvoorbeeld) Schaum (1986).

Bijlage D

Tabel D.1 *Overzicht dagen met gunstige windrichting (230°-300°) tijdens de meetperiode (1 augustus 2007 - 15 oktober 2007). Op de meetdagen was er geen neerslag*

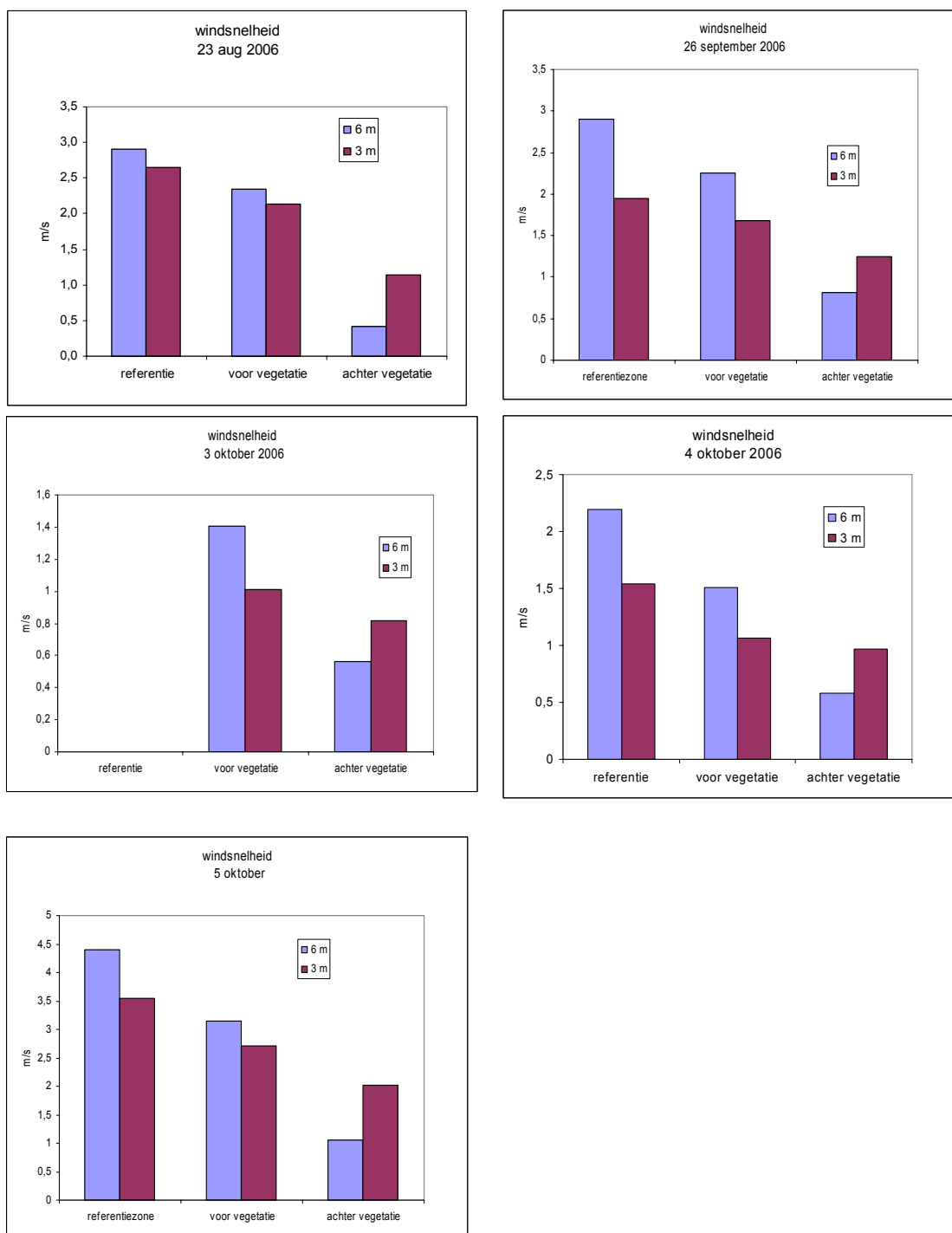
Windrichting	Meetdag	Neerslag	Neerslag
>230<300		mm	wegdek nat
2-aug-06 11:30		29	ja
4-aug-06 11:30		4	ja
9-aug-06 11:30		2	ja
10-aug-06 11:30		3	ja
11-aug-06 11:30		5	ja
14-aug-06 11:30		12	ja
15-aug-06 11:30		nee	nee
21-aug-06 11:30		5	ja
22-aug-06 11:30		2	ja
23-aug-06 11:30	X	nee	nee
26-aug-06 11:30		nee	nee
27-aug-06 11:30		6	ja
28-aug-06 11:30		12	ja
29-aug-06 11:30		9	ja
30-aug-06 11:30		9	ja
26-sep-06 11:30	X	nee	nee
3-okt-06 11:30	X	nee	nee
4-okt-06 11:30	X	nee	nee
5-okt-06 11:30	X	nee	nee
7-okt-06 11:30		2	ja
12-okt-06 11:30		1	ja

Bijlage E

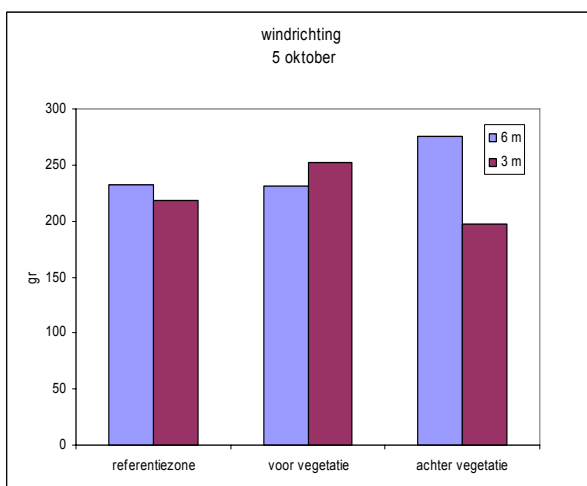
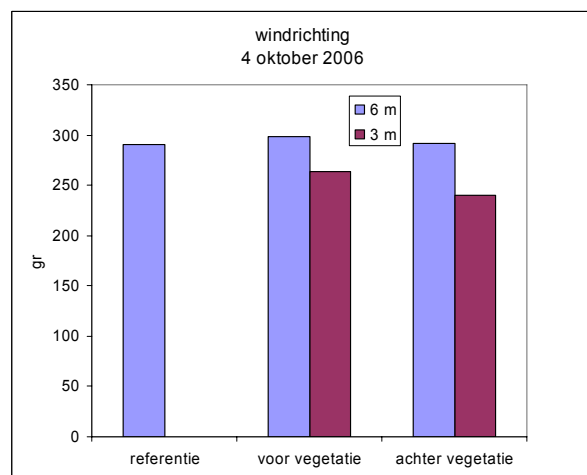
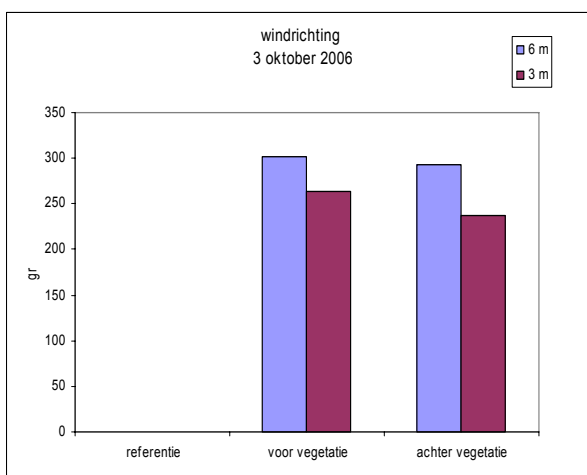
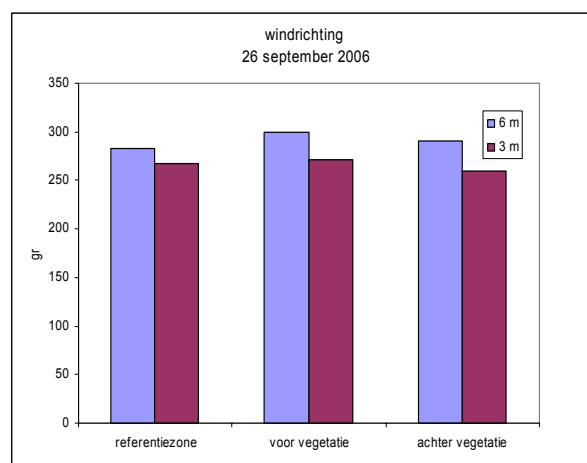
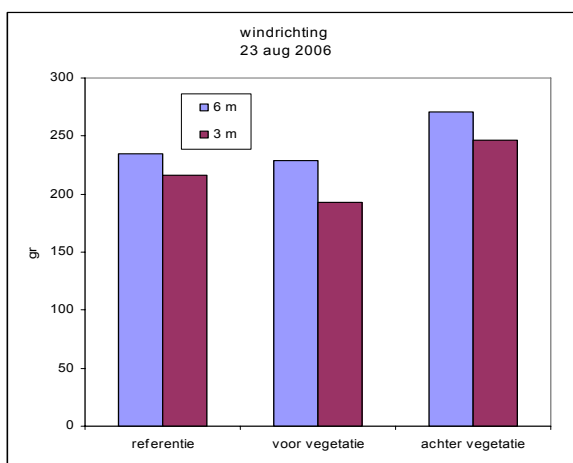
Figuur E.1 en E.2 geven voor elke meetdag de gemiddelde windsnelheden respectievelijk windrichting geregistreerd voor en achter de vegetatie alsmede op het referentiepunt (op 3 m van de wegrand). De windsnelheden voor en achter de strook en op het referentiepunt vertonen per meetdag een overeenkomstig patroon. De hoogste windsnelheid wordt telkens gemeten op het referentiepunt. De laagste windsnelheden komen achter de vegetatie voor wat ook te verwachten was. Die afname varieert nogal: tussen de 10 en 50% op 3 m hoogte. De optredende windsnelheidsverschillen voor en achter de strook zijn een (lineaire) functie van de heersende windsnelheid (Figuur E.3). Met betrekking tot de windrichting is er geen sprake van substantiële veranderingen voor en achter de strook in vergelijking met de wind richting op het referentiepunt.

Een voorbeeld van het effect van de vegetatiestrook op de grootte van de windsnelheid op een afstand van 45 m van de strook is te zien in Figuur E.4. Als de (achtergrond-)wind ruikt van Zuid naar West neemt de windsnelheid op 45 m af. Dit is het gevolg van een toenemende obstructie van de vegetatie.

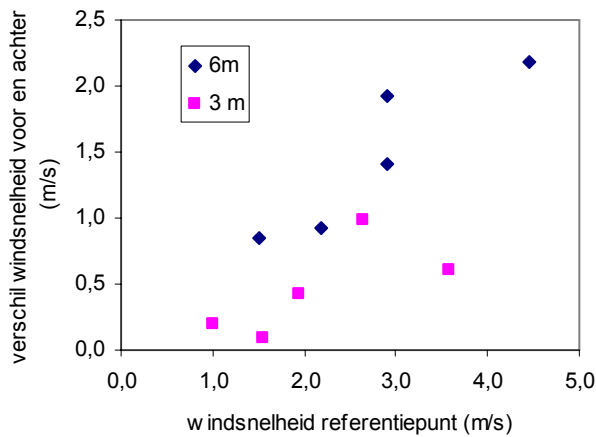
Op ongeveer halverwege de obstakelhoogte is de vegetatiestrook breder dan daaronder (en op afstand waargenomen daarboven). Dit leidt tot een niet-constante doorlaatbaarheid met de hoogte. Inderdaad blijkt de gemiddelde windsnelheid op 6 m hoogte achter de vegetatie (systematisch) *lager* dan op 3 m hoogte (zie Figuren E.1). Ook was het verschil voor en achter de strook groter dan op 3 m. Dit demonstreert o.a. dat de uitkomst van metingen langs een groenelement sterk bepaald kunnen worden door de kenmerken van de vegetatie in de onmiddellijke nabijheid. De gemiddelde windprofielen tot 6 m hoogte voor, achter en op het referentiepunt zijn afgebeeld in Figuur E.5. De windsnelheid op 20 m is geschat op basis van het logaritmisch windprofiel (bij neutrale stabiliteit) en de metingen op het referentiepunt op 90 m afstand van de weg. Boven de boomkruin zal sprake zijn van een onderschatting van de windsnelheid. De gemiddelde verticale windsnelheid vlak voor de vegetatie op 6 m was 0,23 m/s. Achter de vegetatie was deze naar beneden gericht en geringer: minder dan 0,1 m/s. Dit is te verwachten zo vlak achter het obstakel. De aanvulling vanuit de hogere niveaus is nog niet op gang gekomen.



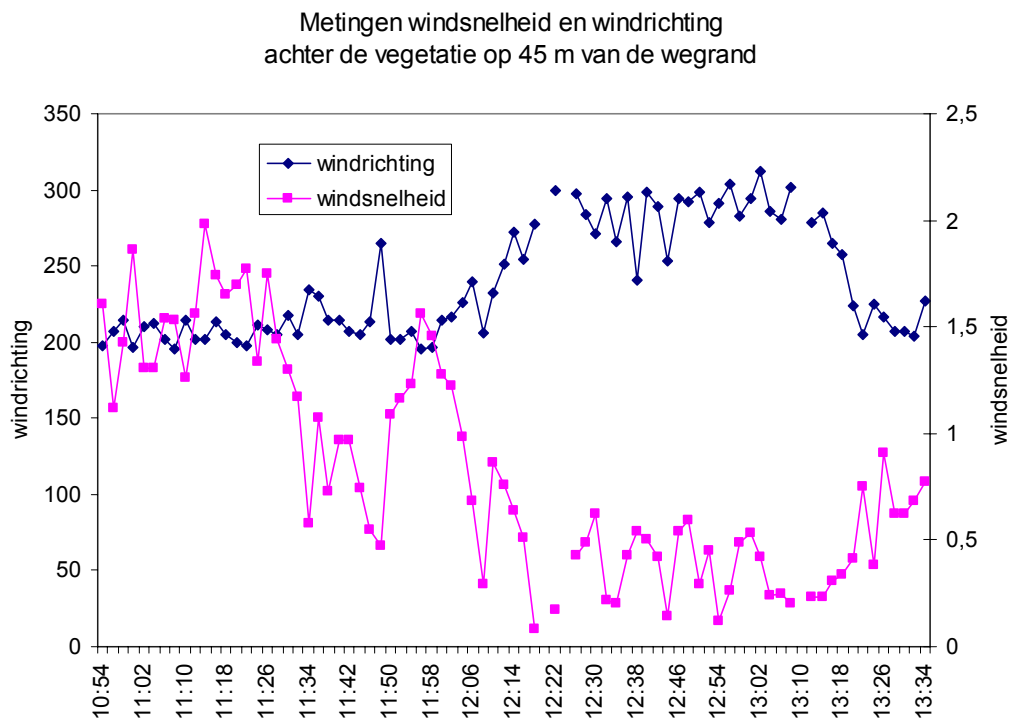
Figuur E.1 *Windsnelheid gemeten op 3 en 6 m hoogte voor en achter de vegetatie (3 resp. 10 m van wegrand) en op het referentiepunt (3m van wegrand)*



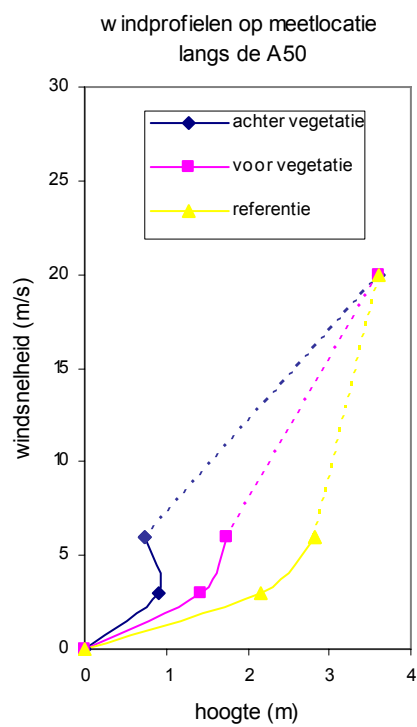
Figuur E.2 Als Figuur E.1, maar nu voor de windrichting



Figuur E.3 *Verschil windsnelheid voor en achter de vegetatiestrook als functie van de windsnelheid (op referentiepunt)*

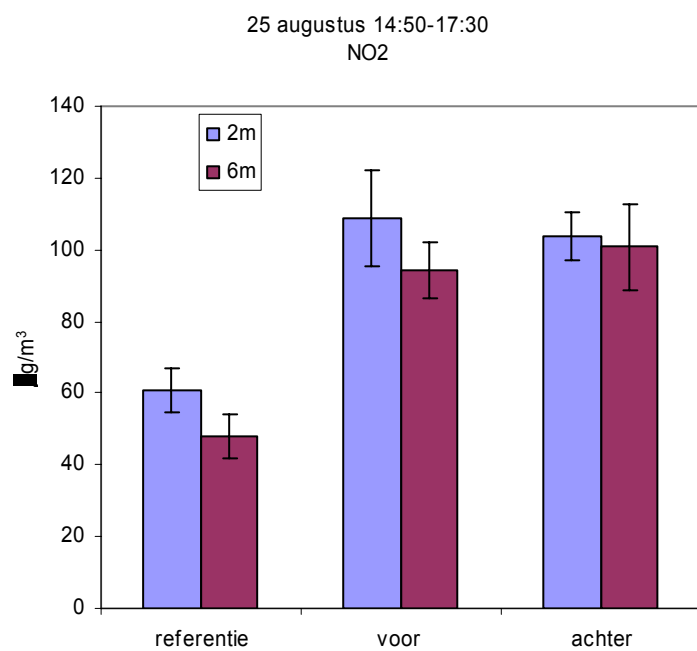
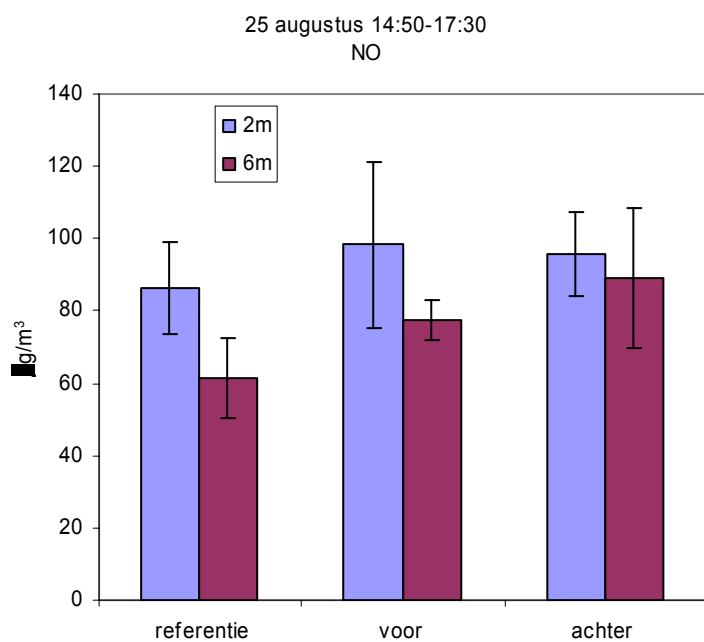


Figuur E.4 *Verloop windrichting en -snelheid bij draaiing van de achtergrondwind van Zuid naar West*

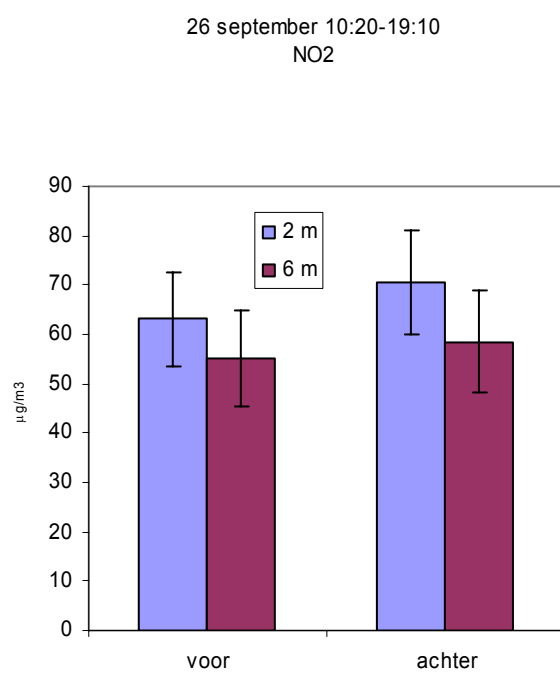
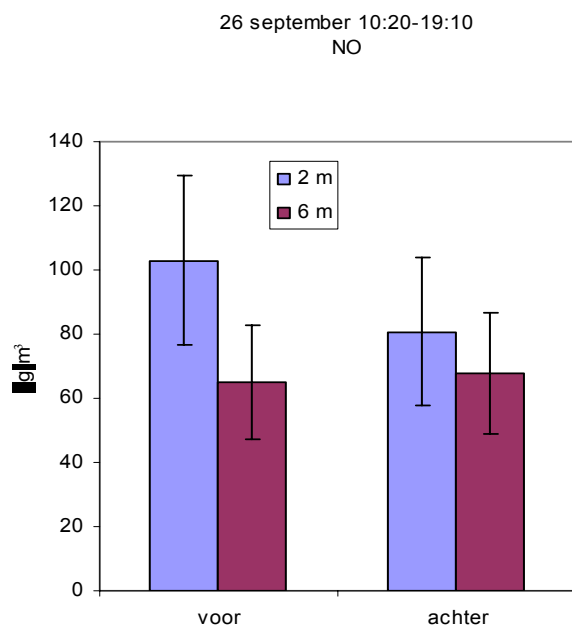


Figuur E.5 *Windprofielen (tot 6 m) op referentiepunt, en voor en achter de vegetatie. Het profiel boven 6 m is een extrapolatie (zie tekst)*

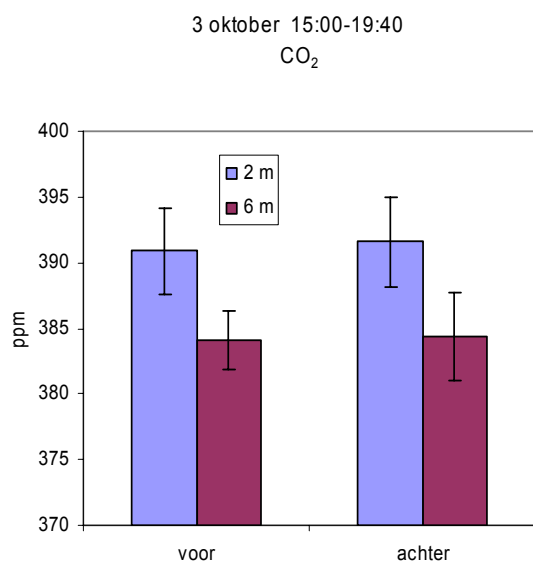
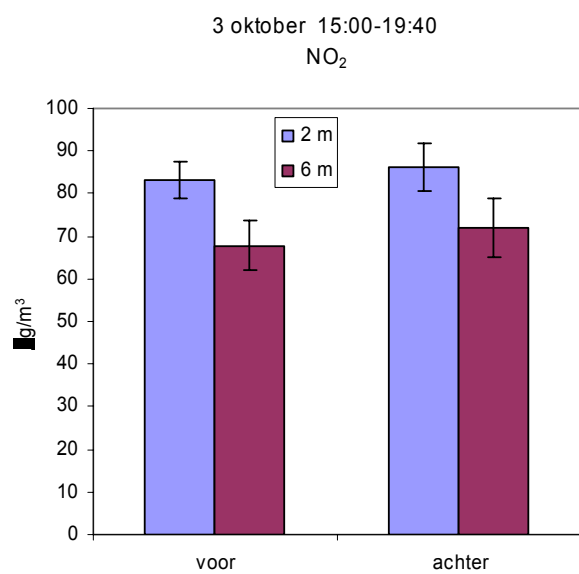
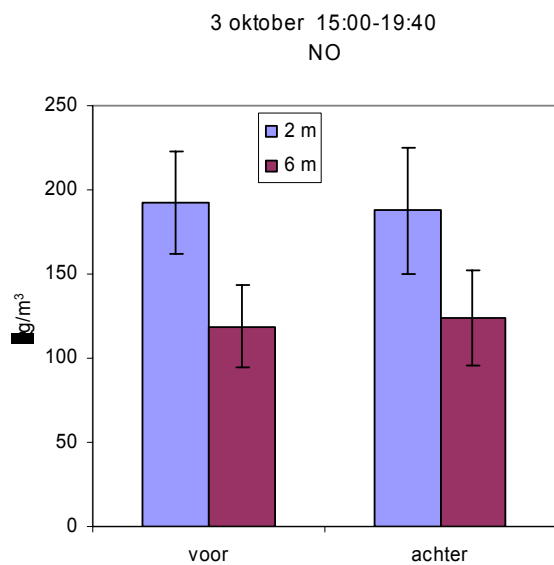
Bijlage F



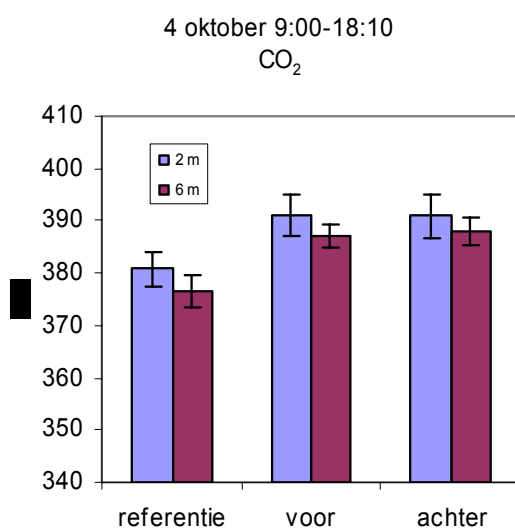
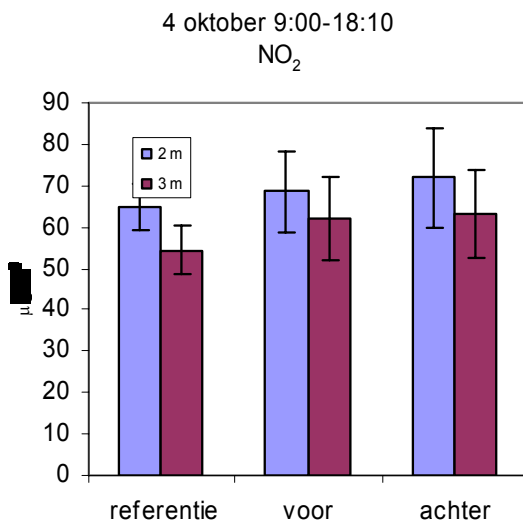
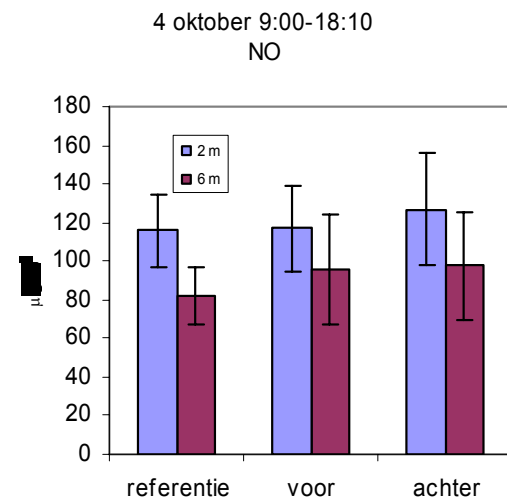
Figuur F.1 *Gemiddelde concentraties op 25 augustus vlak voor en achter de vegetatiestrook en op het referentiepunt (3 m van de wegrand)*



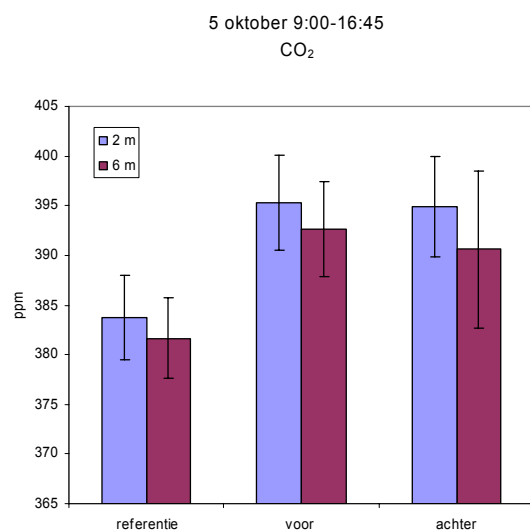
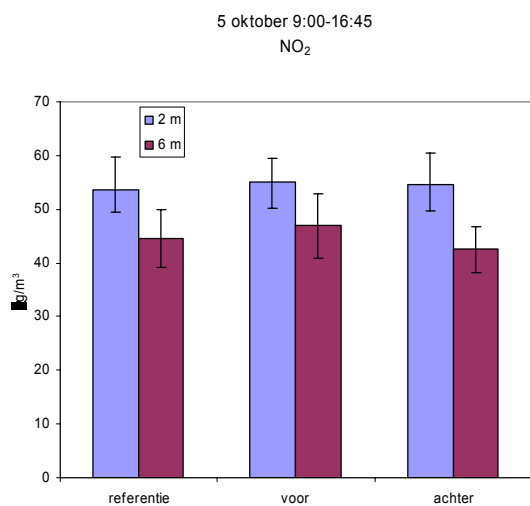
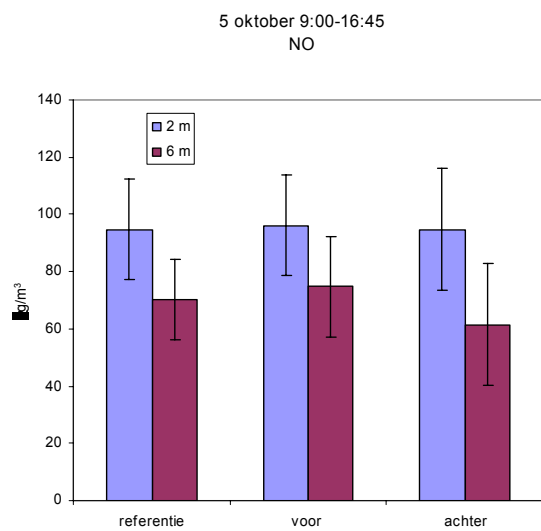
Figuur F.2 *Gemiddelde concentraties op 26 september vlak voor en achter de vegetatiestrook*



Figuur F.3 *Gemiddelde concentraties op 3 oktober vlak voor en achter de vegetatiestrook*

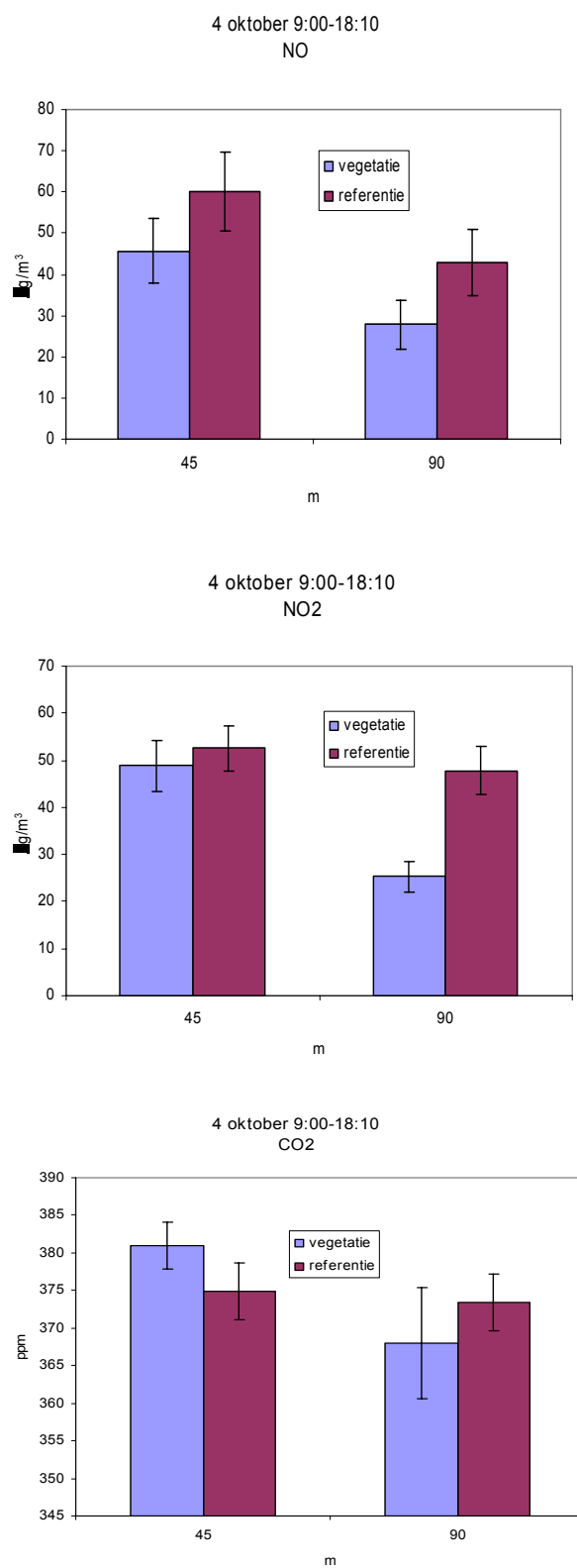


Figuur F.4 *Gemiddelde concentraties op 4 oktober vlak voor en achter de vegetatiestrook en op het referentiepunt (3 m van de wegrand)*

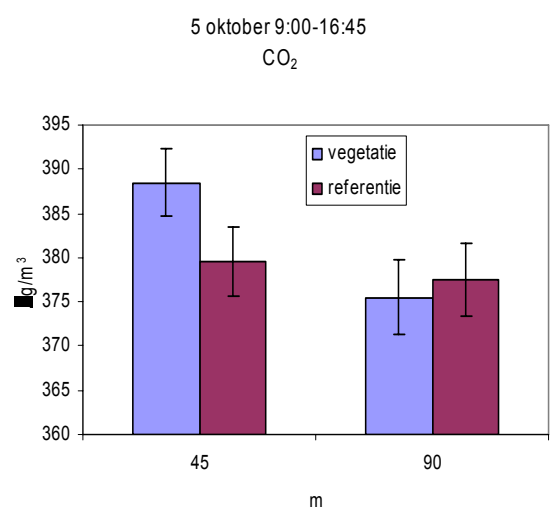
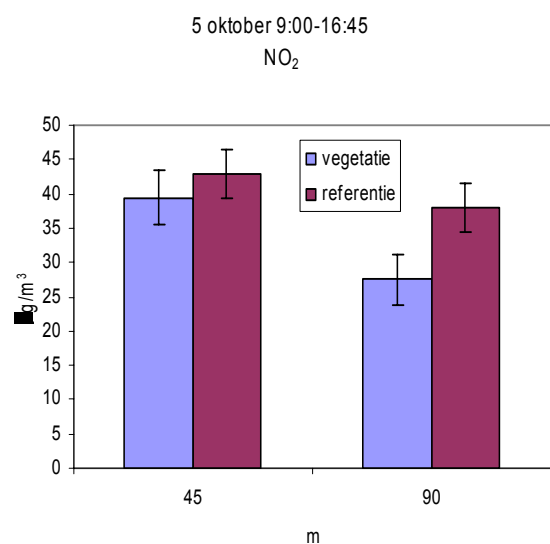
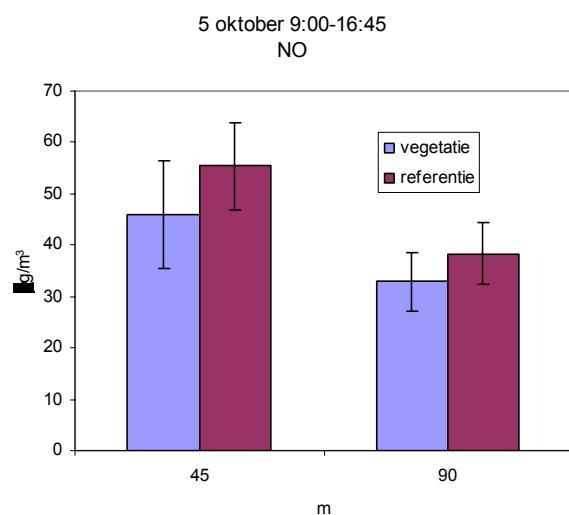


Figuur F.5 *Gemiddelde concentraties op 5 oktober vlak voor en achter de vegetatiestrook en op het referentiepunt (3 m van de wegrand)*

Bijlage G



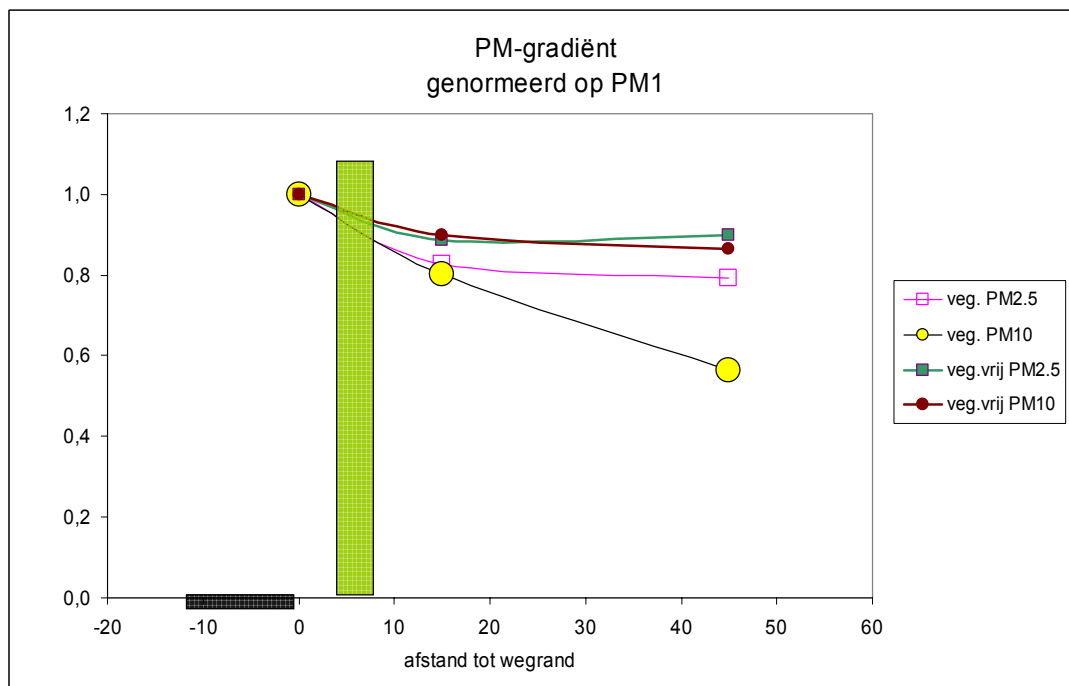
Figuur G.1 *Concentraties en standaardafwijkingen achter de vegetatie op 45 en 90 m van de wegrand (4 oktober)*



Figuur G.2 *Concentraties en standaardafwijkingen langs de referentielijn en achter de vegetatie op 45 en 90 m van de wegrand (5 oktober)*

Bijlage H

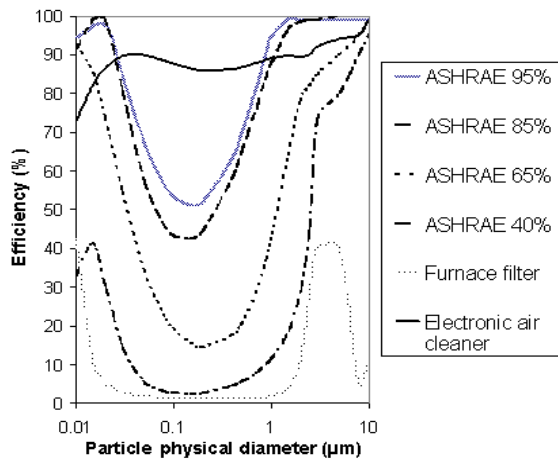
Het is aannemelijk te maken dat het gedrag van PM_1 vooral bepaald wordt door de luchtbewegingen ('verdunning'); voor een toelichting in deze zie het kader hieronder. Door nu de concentraties van PM_{10} en $PM_{2.5}$ te delen door die van PM_1 wordt het verlies door adsorptie en depositie zichtbaar gemaakt (Figuur H.1).



Figuur H.1 *Gradiënten fijnstofconcentraties na normering op PM_1*

Bij transport van stofdeeltjes door een obstructie (als een filter of vegetatiestrook) kan verlies optreden. Dit verlies is o.a. afhankelijk van de grootte van het aerosol, de windsnelheid, de diepte van de obstructie, de grootte van de doorgangen in de obstructie alsmede fysische en chemische toestand van aerosol en gas. Bij obstructies of media die bij uitstek geschikt zijn voor het afvangen van aerosol, luchtstoffilters, hangt de vangsteffektiviteit af van deze factoren. De beste filters zijn HEPA-filters, die vangen aerosol af voor 99.9 % of beter. Slechte filters zijn zeer open gewezen filter van geringe diepte, zoals filters die gebruikt worden voor huishoudelijk gebruik in bijvoorbeeld afzuigkappen. De afvangst is dan ca. 50% voor 5 tot 10 μm deeltjes, maar vrijwel 0% voor deeltjes met een diameter rond 0.3 μm , dit zijn de moeilijkst te vangen deeltjes.

Het gedrag van deeltjes met verschillende diameter in relatie tot gassen kan gedemonstreerd worden aan de hand van de afvangst van stoffilter met verschillende efficiency. In onderstaande figuur zijn hiervan voorbeelden te zien voor verschillende type filters waaronder het filter uit een afzuigkap (furnace filter).



Figuur H.2 De afvangst (uitgedrukt als percentage) van deeltjes als functie van de diameter voor verschillende filtertype (Bron: Environmental Protection Agency)

In zijn algemeenheid kan gezegd worden dat voor deeltjes kleiner dan 1 μm de afvangst van deeltjes sterk is afgenomen en/of nog verder afneemt. Dat grotere deeltjes beter worden afgevangen komt omdat i) de kanaalgrootte in het filter de doorgang niet toelaat en ii) de kronkelige doorgangen in het medium niet gevolgd kunnen worden en de deeltjes tegen de wand komen. De kleinere deeltjes blijken zich steeds meer als gasmoleculen te gedragen ofwel de deeltjes bewegen zich door het gas heen net als de gasmoleculen zelf. Voor nog kleinere deeltjes is overigens weer sprake van een toename in de afvangst door diffusie dat hier verder niet wordt besproken. De massabijdrage van deze heel kleine deeltjes is verwaarloosbaar.

Vermeld moet nog worden dat aerosol uit de uitlaat van voertuigen een deeltjesgrootte heeft van tussen enkele nanometers tot enkele honderden nanometers ofwel van 0.001 μm tot ongeveer 2-3 μm . De massaverdeling piekt in het algemeen rond de 0,2 tot 0,3 μm , een gebied dat door filters minder goed wordt afgevangen.

Bijlage I

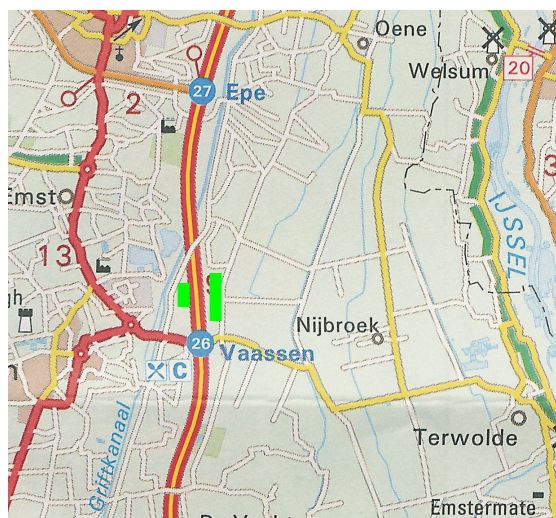
Hieronder volgt de beschrijving van de locatie ter hoogte van de afslag Vaassen langs de A50 zoals omschreven door ES Consulting (zie ook ES Consulting, 2006).

Ligging haag/groenstructuur

Locatie: langs de A50 ten noorden van afslag 26 Vaassen.

Oriëntatie: van zuidzuidoost 160°-170° naar noordnoordwest 340°- 350°.

Noord



Kenmerken meetlocatie (van zuid naar noord)

350m (hmp 216.3 - 216.6): open

550m (hmp 216.6 - 217.2): groenstructuur enkelzijdig, oostzijde

700m (hmp 217.2 - 217.9): groenstructuur aan beide wegzijden, oost- en westzijde

Hoogte: 8-11m

Breedte: 3 - 4 meter (= 0,25 h.)

Dichtheid: constant

Soorten: n.t.b.

Bereikbaarheid

Wegzijde: tussen wegvak en haag ligt een smalle grasstrook van ca. 5 meter

Achterzijde: achter noordelijk deel ligt een ventweg

Overzijde: plaatselijk via insteken bereikbaar

Beschrijving/karakteristiek haag/vegetatie:

De vegetatie bestaat uit bladverliezende bomen en struiken gesitueerd in haagsgewijze opstand. De openheid in wintertoestand bedraagt gemiddeld meer dan 50%. De openheid in de zomertoestand bedraagt naar schatting 30% - 40% voor de bomen doch voor de onderbegroeiing van struiken 40% - 50%. Bij winddruk is de openheid groter door dat de haag als gevolg van de beperkte breedte meer doorlatend reageert. De openheid bedraagt dan 40% - 50%.



Foto: Es Consulting

Figuur I.1 *Locatie 1 A50 Vaassen: Oostzijde; voorzijde haag met smalle grasstrook*



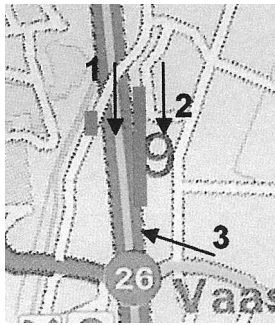
Foto: Es Consulting

Figuur I.2 *Locatie 1 A50 Vaassen: Oostzijde; achterzijde haag met ventweg en open weiland*



Foto: Es Consulting

Figuur I.3 *Locatie 1 A50 Vaassen: Open terrein*



Figuur I.4 Fotolocaties

Windklimaat

Het windklimaat is op basis van de frequentietabellen van het KNMI meetstation 275 Deelen geïnventariseerd gedurende de maanden waarin naar alle waarschijnlijkheid gemeten zal worden.

Tabel I.1 Frequentietabel

	Juni	Juli	Augustus	Tijdens meting
(Windluw (≤ 1 m/s))	6,4%	7,1%	8,6%	o
Noord	6,6%	4,9%	4,7%	
Noordnoordoost	6,8%	6,1%	5,5%	-
Noordoost	7,4%	6,9%	6,9%	-
Oost	5,7%	6,3%	7,8%	-
Zuidoost	5,2%	5,8%	7,9%	-
Zuidzuidoost	3,8%	3,5%	4,4%	-
Zuid	4,9%	4,6%	5,8%	o
Zuidzuidwest	12,1%	11,3%	12,2%	o
Zuidwest	13,3%	15,2%	13,0%	+
West	10,2%	10,8%	8,7%	+
Noordwest	8,9%	9,7%	7,2%	+
Noordnoordwest	7,9%	7,1%	6,6%	o

(- = niet geschikte, o = matig geschikte, + = geschikte windrichting gedurende meet sessie)

Conformiteit eisen meetlocatie

De haag dient aan alle eisen voor de meetlocatie te voldoen om geschikt te zijn voor het meetprogramma. De geschiktheid is per criterium aangegeven. Een codering matig in de reeks is acceptabel, doch een codering onvoldoende maakt de vegetatie/haag ongeschikt als meetlocatie.

Tabel I.2 Eisen meetlocatie

Criterium	Beoordeling	Opmerkingen
a. Ligging langs een snelweg of drukke provinciale weg	+	
b. Meetlocatie windafwaarts van de weg voor min. 50% van de tijd	+	
c. Wind staat maximaal onder 45 gr op de groenstructuur	o	
d. Opstelruimte meetapparatuur voor en achter de groenstructuur	o	Wegzijde krap
e. Naast wegvak met vegetatie is wegvak (vrijwel) zonder vegetatie	+	
f. Hoogte vegetatie 6-10m	+	
g. Gelijkmatige dichtheid van vegetatie over de hele hoogte	+	
h. Profiel van voet tot kruin uniform	+	
i. Openheid vegetatie 30-40%	o	

(- = niet voldoende, o = matig voldoende, + = voldoende aan basiseisen meetlocatie)

Conclusie

De geschiktheid van de locatie hangt met name af van de plaatsingsmogelijkheid van de meetmast in het gedeelte tussen wegvak en haag. De haag is in juni voor 70,1% , in juli 70,7% en in augustus 66,8% van de tijd aan wind van wegvak naar haag blootgesteld. In juni is er echter maar 32,4%, in juli 35,7% en in augustus 28,9% van de tijd sprake van een hoek van de wind $\leq 45^\circ$. De windluwe periode (6,4% voor juni / 7,1% voor juli / 8,6% voor augustus) is echter gunstig omdat door ligging van de haag nabij het wegvak de rijwind van het verkeer gassen en stoffen naar de haag zal voeren.

De openheid bij winddruk (gevolg van geringe breedte haag gerelateerd aan openheid) resulteert in een hogere doorstroombaarheid dan gewenst uit oogpunt van ontwerpcriteria, hetgeen kan leiden tot concentratieverhogingen kort achter de haag. Bij lage windsnelheden doet dit fenomeen zich in veel beperktere mate voor.