



Energy research Centre of the Netherlands

# **Vegetatie langs wegen en Luchtkwaliteit**

## **Perceel I: A50 Vaassen**

**A.T. Vermeulen**

**A. Kraai**

**J.H. Duyzer**

**E.J. Klok**

**A.A. Pronk**

*IPL rapportage*

# Vegetatie voor een betere luchtkwaliteit

Prijsvraag "Meten is weten"

Perceel 1: A50 Vaassen

De invloed van vegetatie langs (snel)wegen op de luchtkwaliteit.

Eindrapport



Rapportnummer DVS-2009-012

Status: Eindrapport

Bedrijfsnaam: Combinatie ECN/TNO/PRI

Datum: juli 2009

Het innovatieprogramma Luchtkwaliteit (IPL) werkt in opdracht van de ministeries van Verkeer en Waterstaat en VROM aan innovatieve oplossingen die bijdragen aan verbetering van de luchtkwaliteit op en rond snelwegen. De focus ligt op snelwegen bij dichtbevolkte gebieden (zgn. "hot spots"). Daar zal bronbeleid pas op termijn toereikend zijn om de luchtkwaliteit wat betreft NO<sub>2</sub> en PM<sub>10</sub> aan de normen te laten voldoen. IPL-maatregelen kunnen onderwijl bijdragen aan verbetering. De Dienst Verkeer en Scheepvaart (DVS) van Rijkswaterstaat voert het IPL uit. Met het beschikbare onderzoeksbudget identificeert, selecteert, stimuleert en beproeft het IPL kansrijke ideeën voor oplossingen. Deze worden tot en met 2008 onderzocht en beproefd. Zodra een maatregel haalbaar blijkt, wordt daarover een positief advies afgegeven. Het IPL werkt samen met kennis- en onderzoeksinstituten, andere departementen, provincies, gemeenten en marktpartijen.

# Colofon

- 1. Rapportnummer**  
DVS-2009-012
- 2. Titel en ondertitel**  
Vegetatie langs wegen en Luchtkwaliteit;  
Perceel I:A50 Vaassen
- 3. Datum rapport**  
Juli 2009
- 4. Code uitvoerende organisatie**  
Combinatie ECN/TNO/PRI
- 5. Schrijver(s)**  
A.T. Vermeulen  
A. Kraai  
J.H. Duyzer  
E.J. Klok  
A.A. Pronk
- 6. Nummer rapport uitvoerende organisatie**  
ECN-O--09-016
- 7. Naam en adres opdrachtnemer**  
ECN  
Postbus 1  
1755 ZG Petten
- 8. Projectnaam**  
Vegetatie voor een betere Luchtkwaliteit -  
perceel I
- 9. Naam en adres opdrachtgever**  
Rijkswaterstaat, Dienst Verkeer en Scheepvaart  
Innovatie Programma Luchtkwaliteit  
Postbus 5044  
2600 GA Delft
- 10. Contractnummer**  
DWW-3124
- 11. Type rapport**  
Eindrapport
- 12. Opmerkingen**  
-
- 13. Trefwoorden**  
IPL, fijnstof, stikstofoxide, verspreiding,  
vegetatie, depositie, fotochemie
- 14. Referaat**  
In deze rapportage wordt het onderzoek naar de bijdrage van vegetatie op de luchtkwaliteit beschreven voor een project van bestaande vegetatie langs de A50 bij Vaassen. Bij dit onderzoek is via metingen en modellering aangetoond dat er geen tot gering effect van de vegetatie op de niveaus van luchtverontreinigingen wordt waargenomen langs de snelweg. Fijn stof- ( $PM_{10}$ ) en Stikstofdioxide- ( $NO_2$ ) concentraties laten geen significant aantoonbare lagere concentraties zien direct achter de vegetatie en op 90m afstand van de weg. In de modellering komt dit voor zowel fijn stof als voor stikstofoxiden overeen met de metingen.
- 15. Aantal blz.**  
Circa 40 (exclusief bijlagen)
- 16. Acceptatie projectleider**  
A. van den Burg
- 17. Acceptatie interim programmamanager IPL**  
Ir. W. van den Pangaard
- 18. Acceptatie afdelingshoofd I&I**  
Ir. G. Debeus
- 19. Acceptatie directeur Mobiliteit**  
Drs. Ing. A.L.J. Sprangers

De Dienst Verkeer en Scheepvaart van Rijkswaterstaat heeft de in deze publicatie opgenomen gegevens zorgvuldig verzameld naar de laatste stand van wetenschap en techniek. Desondanks kunnen er onjuistheden in deze publicatie voorkomen. Het Rijk sluit iedere aansprakelijkheid uit voor schade die uit het gebruik van de hierin opgenomen gegevens mocht voortvloeien.



# Inhoudsopgave

Samenvatting.....	7
1. Inleiding.....	9
1.1 Achtergrond.....	9
1.2 Doel.....	9
2. Methodiek.....	11
2.1 Metingen luchtkwaliteit.....	11
2.1.1 Zomer en winter meetcampagne.....	11
2.1.2 Meetlocatie.....	11
2.1.3 Meetopzet.....	12
2.1.4 Meetapparatuur.....	13
2.2 Metingen vegetatie.....	16
2.2.1 De karakterisering van de vegetatie.....	16
2.2.2 De optische porositeit van de vegetatie.....	16
2.2.3 Het LAD profiel van de vegetatie.....	16
2.2.4 De geleidbaarheid van de huidmondjes en de pF-curve.....	16
3. Modelopzet PanAir.....	19
3.1 Doel modelberekeningen.....	19
3.2 Modelbeschrijving.....	19
3.2.1 Instellingen voor het terrein.....	19
3.2.2 Instellingen voor de vegetatie.....	19
3.2.3 Meteorologie.....	19
3.2.4 Bronnen.....	19
3.2.5 Chemie.....	20
3.2.6 Depositie.....	20
3.2.7 Ruimtelijke resolutie.....	20
3.2.8 Tijdintegratie.....	20
3.3 Modelopzet A50 Vaassen.....	20
3.3.1 Locatie en modelconfiguratie.....	20
3.3.2 Vegetatiekenmerken.....	21
3.3.3 Monitorpunten.....	21
3.3.4 Meteorologie.....	21
3.3.5 Turbulentiemodel.....	21
3.3.6 Verkeersemissies.....	21
3.3.7 Achtergrondconcentraties.....	22
3.3.8 Turbulentie door verkeer.....	22
3.3.9 Mesh.....	22
3.3.10 Chemie.....	22
4. Resultaten en discussie: Metingen.....	24
4.1 Metingen Vegetatie.....	24
4.1.1 De karakterisering van de vegetatie.....	24
4.1.2 De optische porositeit.....	24



4.1.3	Het leaf area density (LAD) profiel .....	24
4.1.4	De geleidbaarheid van de huidmondjes en de pF-curve .....	25
4.2	Metingen Luchtkwaliteit .....	26
4.2.1	Algemeen .....	26
4.2.2	Metingen NO/NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> .....	27
4.2.3	Metingen O <sub>3</sub> .....	35
4.2.4	Metingen fijn stof .....	36
5.	Resultaten en discussie: Modellerings .....	40
5.1	Inleiding .....	40
5.2	Gemodelleerd vegetatie-effect .....	40
5.3	Vergelijking met metingen .....	42
5.4	Gevoeligheidsonderzoek .....	45
6.	Conclusies .....	48
6.1	Effectiviteit van vegetatie op vermindering concentraties .....	48
6.2	Invloed van vegetatie op de verspreiding .....	48
6.3	Modellerings .....	48
	Literatuur .....	50
Bijlage A	Resultaten van de vegetatieopname op 28 mei 2008 .....	52
Bijlage B	Samenvatting resultaten metingen zomer en winter .....	54

# Proloog

ECN, Luchtkwaliteit & Klimaatverandering  
Alex Vermeulen  
Aline Kraai



TNO, Bouw en Ondergrond  
Jan Duyzer  
Lisette Klok



Plant Research International BV  
Annette Pronk



# Voorwoord

Samenwerking tussen overheid en marktpartijen biedt kansen om innovatie te bevorderen; zo ook in de GWW sector. Met die gedachte heeft Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde begin 2006 de prijsvraag "Verbetering van wegdekken" uitgeschreven. Bij deze prijsvraag is aan marktpartijen gevraagd om complexe vraagstukken op het gebied van luchtkwaliteit, geluidsreductie en levensduur van tweelaags-ZOAB op te lossen aan de hand van anticiperend onderzoek.

Ervaringen bij het programma 'Wegen naar de Toekomst' hadden toen al geleerd dat een alternatieve marktbenadering, zoals een prijsvraag vaak leidt tot verrassende oplossingen die ook in de praktijk implementeerbaar zijn.

De prijsvraag 'Vegetatie voor een betere luchtkwaliteit' bestaat uit twee verschillende onderdelen, of percelen met elk een eigen onderzoeksvraag.

- Perceel 1: de invloed van een bestaande vegetatiestrook langs de A50 bij Vaassen
- Perceel 2: de invloed van een nieuw aangelegde vegetatiestrook langs de A50 bij Valburg

Voor perceel 1 betrof het de volgende personen:

## Rijkswaterstaat DVS

Aad van den Burg  
Sander Pijlman  
Paul Fortuin

## Marktpartijen

*ECN Luchtkwaliteit & Klimaatverandering*  
Alex Vermeulen  
Aline Kraai

## Rijkswaterstaat DON

Harry Otterman

*TNO Bouw en Ondergrond*  
Jan Duyzer  
Lisette Klok

*Plant Research International BV*  
Annette Pronk

# Samenvatting

Vegetatie langs de (snel)weg heeft een onbekende invloed op de luchtkwaliteit verderop. In de literatuur worden sterke claims gelegd op mogelijke reducties van fijn stof en stikstofoxiden door filterende werking van de vegetatie. Daarnaast oefent vegetatie een grote invloed uit door zijn obstructiewerking, leidend tot meer turbulentie, sterkere verdunning en soms lokaal hogere concentraties.

Het is daarom van belang om in representatieve situaties in de praktijk vast te stellen hoe groot de effecten van vegetatie op luchtkwaliteit nu werkelijk zijn. In opdracht van IPL zijn daarom twee studies uitgevoerd op locaties langs de A50. Op perceel I, deze studie, is gekeken naar bestaande vegetatie langs de snelweg. Op perceel II, 100 km zuidelijker, is gekeken naar een speciaal voor het onderzoek aangeplante situatie.

De beschouwde vegetatiestrook langs de A50 bij Vaassen betrof een bladverliezende vegetatie. Daarom is gekeken naar de zomer- en de wintersituatie. In de zomer zijn de vegetatieinvloeden het sterkst door de aanwezigheid van het blad. Naast de metingen is ook gerekend aan de situatie met een CFD model, PanAir.

In model en metingen zijn de effecten op de concentratie relatief laag (0-26% voor NO<sub>2</sub> en <5% voor PM10) en daarom moeilijk te meten met de campagnewijze 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 µm vastgesteld dat het effect van filtering door de vegetatie nihil is.

Voor het totaal aan fijn stof en NO<sub>x</sub> 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 NO<sub>x</sub> op afstanden vanaf 40m van de weg, voor NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>x</sub> en PM door het compenserende effect van een verhoogde verdunning. Deze extra verdunning leidt in de zomer wel tot relatief hogere NO<sub>2</sub> concentraties direct achter de vegetatie door inmenging van extra Ozon.

Indien nadere metingen gewenst zijn om de aan- of afwezigheid van effecten met grotere nauwkeurigheid vast te stellen wordt aanbevolen om de metingen uit te voeren vanuit vaste opstellingen met automatische en regelmatige (meermalen per dag) kalibraties.





# 1. Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Het effect van zgn. 'groenelementen' op de (lokale) luchtkwaliteit rond (snel-)wegen is veel bediscussieerd maar nog nauwelijks onderzocht. Dit is niet verbazingwekkend: het is een complex onderwerp waarbij allerlei factoren van invloed zijn op de concentraties van luchtverontreiniging ter plaatse. De eigenschappen van de vegetatie, afstand tot de weg, oppervlakteruwheid, chemische samenstelling en grootte van verkeersemisies, verkeersintensiteit, aanwezigheid van andere bronnen, heersende achtergrondconcentraties, meteorologie; al deze factoren spelen een rol. Het uiteindelijke resultaat is (theoretisch) moeilijk te voorspellen en het doen van kwalitatief goede metingen om de effecten te bepalen is geen sinecure.

Bekend is dat een vegetatiestrook op drie manieren de luchtkwaliteit in de onmiddellijke omgeving kan beïnvloeden, door:

- een filterend effect, d.w.z. het afvangen van verontreinigende componenten waaronder fijn stof en stikstofdioxide.
- een opstuwend effect, d.w.z. de verhoging van de lokale terreinruwheid leidt tot een grotere initiële verdunning van de pluim van verontreiniging afkomstig van de weg dan in de situatie zonder een dergelijke strook.
- verandering van de stromingsrichting van wind en beïnvloeding van de windsnelheid

In een eerder uitgevoerd vegetatieonderzoek op hetzelfde perceel (Weijers *et al.*, 2006) zijn geen verschillen in gasconcentraties gemeten direct achter de vegetatie in vergelijking met de situatie voor de vegetatie en zonder vegetatie. Metingen van fijn stof uitgevoerd voor en achter de vegetatie wijzen wel op een afname van PM10 (ca.20%) en PM2.5 (ca.17%) door een filterend effect van de vegetatie. Wat betreft NO<sub>2</sub> zijn op grotere afstand van de vegetatie (vanaf ca. 30m) 20% lagere concentraties achter de vegetatie gemeten dan op dezelfde afstanden langs de referentielijn.

In het rapport van Wesseling *et al.* (2008) wordt een overzicht gegeven van de verschillende studies van effecten op groen. Conclusie in Wesseling *et al.* is dat uit de beschikbare informatie slechts een beperkt effect van groen op de totale PM10-concentratie in de stad en direct langs een weg te verwachten is.

## 1.2 Doel

In het kader van het Innovatie Programma Luchtkwaliteit (IPL) is het effect van vegetatie op de luchtkwaliteit langs (snel)wegen nader onderzocht. Eerder werd geconstateerd dat dringend meer kennis nodig is van de relatie tussen vegetatie en luchtkwaliteit om de mogelijkheid van het inzetten van vegetatie voor een verbetering van de (lokale) luchtkwaliteit op waarde te kunnen schatten.

Dit onderzoek dient te leiden tot:

- Precieze kwantificering van vegetatie-effecten op de niveaus van luchtverontreiniging
- Betere en uitgebreidere modellering van waargenomen effecten
- Voorspelling van vegetatie-effecten
- Antwoord op de vraag of de 'toepassing van vegetatie' een kansrijke oplossingsrichting is voor de verbetering van de luchtkwaliteit langs (snel-) wegen (en dan met name langs de knelpunten).

Binnen dit onderzoek zijn drie onderzoeksdoelen te onderscheiden:

- Karakterisering van de eigenschappen van vegetatiestrook op de proeflocatie te Vaassen.
- Verkrijgen van inzicht in de effecten van een vegetatiestrook langs een weg op de luchtkwaliteit in het benedenwindse terrein, waarbij de beide hierboven genoemde drie effecten kwantitatief worden getoond. Het experimentele werk richt zich hierbij op het verkrijgen van een set van meetwaarden van de voor regelgeving relevante stoffen. Belangwekkende vragen in deze zijn vervolgens:

- a. Wat zijn de concentraties van gassen en stofdeeltjes op diverse plaatsen voor en achter de vegetatiestrook?
  - b. Hoe verhouden deze zich tot de concentraties in het referentiegebied zonder vegetatiestrook?
  - c. Hoe verhoudt het effect van 'filtering' zich ten opzichte van het effect van de extra turbulentie?
  - d. Welke invloed hebben de eigenschappen van de vegetatie hierop?
3. Het verkrijgen van een gedetailleerd model voor de situatie op de proeflocatie. Het model is gebaseerd op een uitgebreide technische analyse waarin locatie-specifieke eigenschappen zijn meegenomen. Het model wordt gebruikt om een aantal simulaties door te rekenen aan de hand van de verkregen datasets. Naar aanleiding van de resultaten van deze validaties vindt verdere ontwikkeling plaats zodat het model de invloed van de op de proeflocatie aanwezige vegetatie op de luchtkwaliteit zo goed mogelijk kan voorspellen

## 2. Methodiek

### 2.1 Metingen luchtkwaliteit

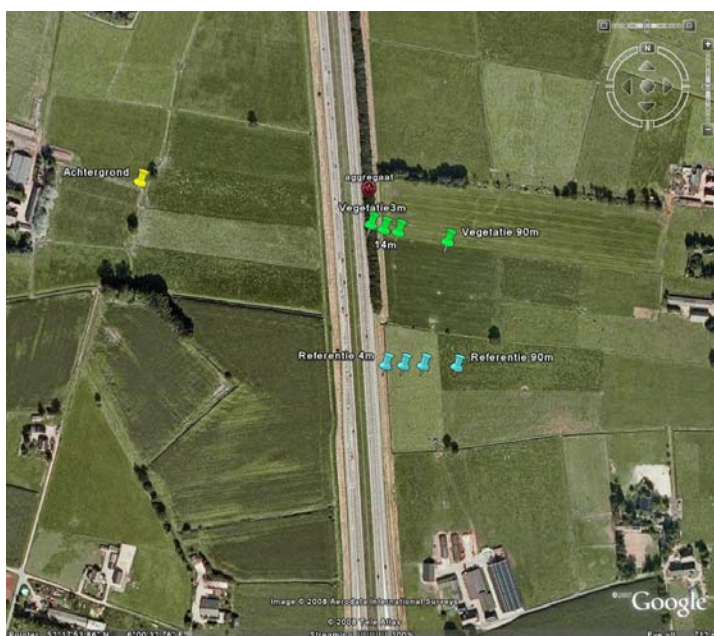
#### 2.1.1 Zomer en winter meetcampagne

Twee meetcampagnes hebben plaatsgevonden voor het bepalen van de invloed van vegetatie langs de weg op de lokale luchtkwaliteit, te weten een zomer- en een wintercampagne. De zomercampagne heeft plaatsgevonden van 30 mei-15 juli 2008. Hierbij heeft gedurende 62% van de tijd de wind uit westelijke richtingen gewaaid. De wintercampagne heeft plaatsgevonden van 2-16 maart 2009. In deze periode heeft de wind 48% van de tijd uit westelijke richtingen gewaaid.

#### 2.1.2 Meetlocatie

Op de locatie aan de A50 te Vaassen zijn al eerder metingen verricht. Voor locatiespecifieke details wordt daarom verwezen naar het ECN rapport E--07-011 (Weijers et al, 2007).

In Figuur 2.1 is een luchtfoto van de meetlocatie te zien met daarin aangegeven de positie van twee lijnen waarlangs metingen met en zonder invloed van de vegetatie zijn uitgevoerd. Er is sprake van een deel langs de snelweg waarlangs géén vegetatie aanwezig is en dat daarom geschikt is voor het doen van de zgn. 'referentiemetingen'. De plaats van deze metingen wordt hier verder ook wel 'referentiemeetlijn' genoemd. In noordelijke richting is een gedeelte mét een vegetatiestrook voor het doen van de metingen die beïnvloed zijn door de aanwezigheid van vegetatie; dit wordt aangeduid met 'vegetatiemeetlijn'. In Figuur 2.2 is de wegzijde van de vegetatiestrook te zien. Afgezien van de aanwezigheid van de vegetatiestrook zijn er verder geen substantiële omgevingsverschillen die een andere verspreiding van de verkeersemissies tot gevolg hebben gehad. Het grote voordeel van deze locatie is dat gelijktijdige metingen mogelijk zijn van enerzijds de verspreiding en turbulentie in een ongestoorde ('normale') situatie en anderzijds in een situatie waarin deze parameters beïnvloed worden door de aanwezigheid van vegetatie. Bijkomend voordeel van deze locatie is dat er geen dominante (industriële) emissiebronnen zijn in de directe omgeving die de metingen verstoren. Aan de westzijde van de weg bevindt zich een zogenaamde 'achtergrondmeting' om de invloed te meten van de emissies die niet afkomstig zijn van de snelweg. In Figuur 2.3 is de vegetatiestrook te zien vanaf het weiland, maar dan in winteromstandigheden. Aan deze foto is duidelijk te zien dat men ook in de winter door de vegetatie en ondergroei heen vrijwel geen auto's kan zien op de weg en er geen blad meer aanwezig is aan de bomen.



Figuur 2.1 Meetlocatie langs de A50 bij Vaassen met aan de oostzijde van de weg een referentiemeetlijn en een vegetatiemeetlijn en aan de westzijde een achtergrondmeting (bron: Google Earth)



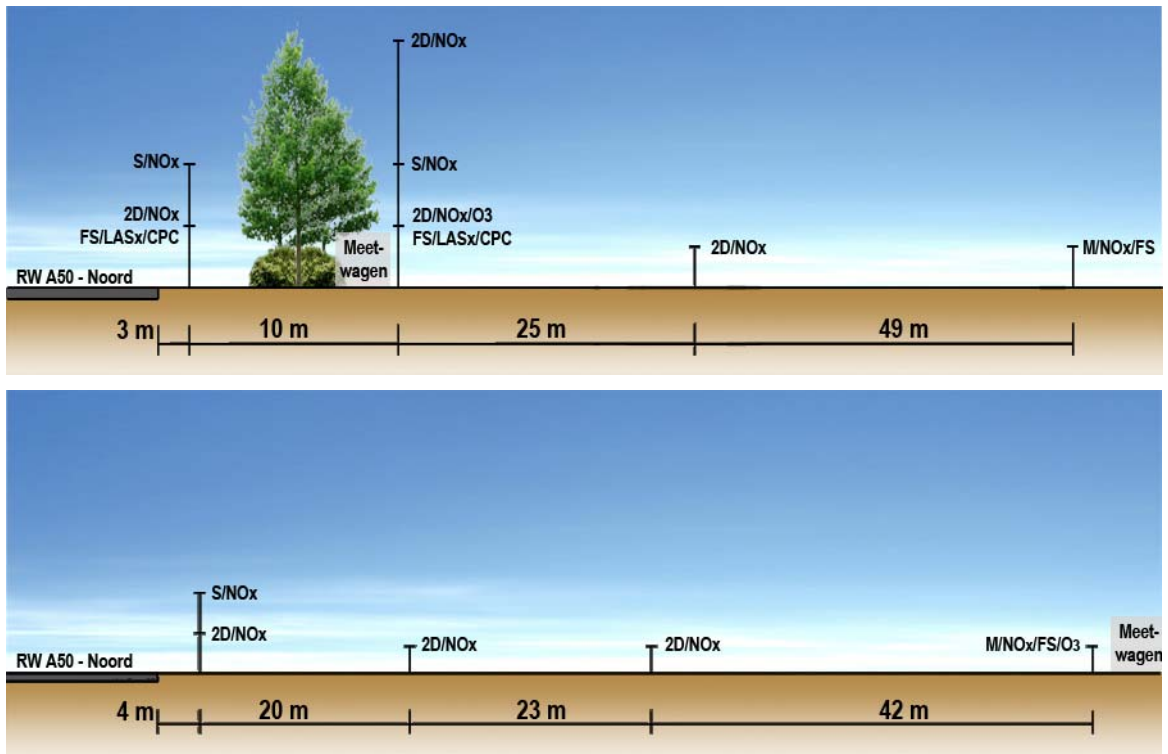
Figuur 2.2 *Beeld van de vegetatiestrook op de meetlocatie in de zomer, gezien vanaf de vluchtstrook aan de rechterkant, kijkend naar het noorden*



Figuur 2.3 *Beeld van de achterzijde (ten opzichte van de weg) van de vegetatiestrook op de meetlocatie in de winter*

### 2.1.3 Meetopzet

De meetlijnen met instrumentarium worden in Figuur 2.4 schematisch weergegeven. De vegetatielijn heeft 4 meetpunten op 3m, 13m, 38m en 87m afstand van de snelweg. De mast op 3m afstand (voor de vegetatie) heeft een hoogte van 6m en de mast op 13m (achter de vegetatie) is 12m hoog met meetpunten op 3, 6 en 12m hoogte. De achtergrondlocatie bevindt zich op ongeveer 200m ten westen van de snelweg.



Figuur 2.4 Schematische opstelling van strook met vegetatie (boven) en zonder vegetatie (onder). (codering: S=3d-sonic, 2D=2d-windsonic, M=mierij, NO<sub>x</sub>=NO + NO<sub>2</sub>, FS=fijn stof met TEOM en Osiris, LASx en CPC=fijn stof met betreffende apparatuur)

De aangegeven codering in de figuur wijst op de gemeten parameter. De gemeten gassen zijn NO<sub>x</sub> en O<sub>3</sub>, daarnaast is PM<sub>10</sub> gemeten met een TEOM en PM<sub>2.5</sub> met een Osiris. Deeltjesgrootte-verdeling en-aantallen zijn gemeten met een LAS-x en CPC respectievelijk. Daarnaast is er op elke locatie windrichting en windsnelheid gemeten met 3D sonische anemometers, 2D windsonics of 2D Mierij windsensoren. Een All Weather Station op de achtergrondlocatie heeft naast windrichting en windsnelheid ook de neerslag, relatieve luchtvochtigheid, luchttemperatuur en luchtdruk gemeten. Meer gedetailleerde omschrijving is te vinden in paragraaf 2.1.4.

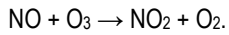
Er zijn 3 meetketen opgebouwd om de apparatuur in te kunnen bergen, één op de achtergrondlocatie, één achter de vegetatie en één achter de referentielijn. Voor de stroomvoorziening werd gezorgd via een generator die in de zomercampagne ongeveer 40m ten noorden van de vegetatielijn is geplaatst. In de keten bij de vegetatie- en referentielijn werden de verschillende locaties geanalyseerd op NO<sub>x</sub> door lucht aan te zuigen via 1/4" getrokken teflon tubing. Via het kleppensysteem kunnen 8 monsterpunten bediend worden. Steeds wordt de lucht van één monsterpunt via het kleppensysteem door de gasmonitoren geleid. Een meetcyclus van een meetlijn met 8 meetpunten duurt 24 minuten.

In de winter is de meetopzet wat gewijzigd. De locaties en meetlijnen zijn gelijk gebleven. NO<sub>x</sub>-metingen zijn verricht op dezelfde afstanden van de weg, maar alleen op 2m hoogte. Verder zijn er in de winter geen fijn stof metingen verricht en ozonmetingen zijn alleen op de achtergrondlocatie uitgevoerd. Verder is de generator voor de stroomvoorziening op het land geplaatst ten oosten van de meetlijnen om uit te sluiten dat er invloed is op de concentraties door uitlaatgassen van de generator.

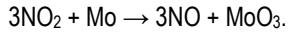
## 2.1.4 Meetapparatuur

### NO<sub>x</sub>

De gebruikte NO<sub>x</sub> monitoren zijn van het type Eco Physics CLD 700 AL. Het zijn NO-NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub> analyzers gebaseerd op het principe van chemoluminescentie. 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<sub>x</sub> (NO+NO<sub>2</sub>) mogelijk zijn. De NO<sub>2</sub> concentratie wordt berekend door de laatste twee van elkaar af te trekken. NO reageert met ozon (O<sub>3</sub>) dat zich door het instrument gegenereerd wordt met behulp van een UV lichtbron:



Een deel van het NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> te meten moet deze gereduceerd worden tot NO. Hiervoor wordt een thermische converter gebruikt met een katalysator op basis van Molybdeen (Mo):



De kalibratie van de gebruikte CLD monitoren met gas standaarden is verricht bij TNO met ijkgasen met 280 ppb NO en 345 ppb NO<sub>2</sub>; deze kalibraties zijn uitgevoerd voor en na beide meetcampagnes. Daarnaast zijn er in de meetcycli voor het meten van de horizontale gradiënten continu vergelijkingsmetingen uitgevoerd tussen de monitoren die zijn ingezet op de twee meetlijnen. Tijdens deze vergelijkingsmetingen was de NO<sub>x</sub>-apparatuur verbonden met leidingen naar één gemeenschappelijke inlaat.

## O<sub>3</sub>

Voor de O<sub>3</sub>-metingen is gebruik gemaakt van monitoren gebaseerd op UV adsorptie (Monitor Labs (8810)). O<sub>3</sub> zal een deel van UV licht absorberen wanneer deze wordt blootgesteld. De intensiteit hiervan is een directe maat voor de O<sub>3</sub>-concentratie. De UV lichtbron is een 254 nm emissielijn van een kwik afscheidende lamp. Ook de O<sub>3</sub> monitoren zijn voor en na beide campagnes gekalibreerd, nu met behulp van gasfasetitratie in het laboratorium van TNO. De nauwkeurigheid van de O<sub>3</sub> monitoren is enkele ppb's.

## Fijn stof

Fijn stof is gemeten door een combinatie van verschillende instrumenten. De TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) werkt op basis van een filter welke ultrasoon in trilling wordt gebracht. Door de massatoename van het filter verandert de eigenfrequentie van de microbalans waaraan dit filter is gekoppeld. Door het meten van de frequentieverandering kan de massa van de afgevangen stof worden bepaald. Het is een continu registrerende monitor die in deze opzet is gebruikt om PM<sub>10</sub> concentratie in de lucht te meten. De TEOM mag gerelateerd worden aan de gravimetrische referentiemethode door een correctiefactor van 1.3 te gebruiken (Meetregeling luchtkwaliteit 2005, VROM).

Op de vijf locaties waar de TEOM's hebben gestaan zijn ook Osirissen geplaatst voor vergelijking en PM<sub>2.5</sub> metingen. De Osiris zuigt buitenlucht aan, via een verwarmde inlaat zonder voorafscheiding van een bepaalde deeltjesfractie. Het werkt volgens een optisch meetprincipe, waarbij lichtverstrooiing van een deeltje een maat is voor de grootte van het deeltje. De aantallen deeltjes in een grootteklasse worden geteld (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>). De massa van de bemonsterde deeltjes wordt dus niet direct gemeten. Voor de omzetting van het aantal deeltjes tot een massa wordt een gemiddeld soortelijk gewicht verondersteld.

Deeltjesgrootteverdeling en aantallen deeltjes in de lucht werden in de zomercampagne van dit project gemeten met een combinatie van Laser Aerosol 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 worden in een zgn. oversize channel gemeten. De LAS-X data maakt het mogelijk de volumeconcentratie te bepalen voor elke klasse alsmede de geïntegreerde volumeconcentratie na sommatie over alle klassen. De massa wordt berekend door een representatief soortelijk gewicht aan te nemen per grootteklasse. De metingen met deze apparatuur hebben plaatsgevonden op vaste punten voor en achter de vegetatie via een aanzuig en kleppensysteem kon met dezelfde apparatuur om de 3 minuten geschakeld worden tussen voor en achter de vegetatie.

Deeltjesapparatuur is gecalibreerd in een daarvoor speciaal gemaakte ruimte waarin deeltjes van één vooral bepaalde grootte wordt verspreid.

## Meteorologische parameters

Op alle locaties en verschillende hoogtes is windsnelheid- en richting gemeten. Gill 3D sonische anemometers (R2, R3 en Windmaster Pro) zijn op de punten op 6m hoogte ingezet voor turbulentie data. Gill Windsonics zijn 2D ultrasoon windmeters en deze zijn ingezet op de meeste locaties op 2m hoogte. Op de locaties op 90m zijn solid state windsensoren (MMW-005, Mierij Meteo) ingezet voor windsnelheid en windrichting. Op de achtergrondlocatie zijn meerdere meteorologische componenten gemeten met een geïntegreerd All Weather Station (WXT510, Vaisala). Naast de windsnelheid en windrichting is met dit instrument ook neerslag, relatieve luchtvochtigheid, luchttemperatuur en luchtdruk gemeten.

## Aanzuigsysteem

De hier gehanteerde aanpak is het aanzuigen van de te bemonsteren lucht vanuit de monsterpunten via 1/4" getrokken teflon tubing. Via het kleppensysteem kunnen 8 monsterpunten bediend worden. Steeds wordt de lucht van één monsterpunt via het kleppensysteem door de gasmonitoren geleid. De gebruikte apparatuur heeft aan drie minuten meting voldoende, twee minuten is voor het spoelen en bereiken van de stabiele eindconcentratie, in de derde minuut wordt de concentratie bepaald als gemiddelde en standaardafwijking van de monitorwaarden. In deze campagnes konden twee of meer volledige gradiëntmetingen per uur plaatsvinden. Alle inlaten waren voorzien van een ozon-scrubber en inlaat filter.

Met dit kleppensysteem is reeds in voorgaande jaren goede ervaring opgebouwd. Via een modificatie van het systeem was het mogelijk kruiselings gelijktijdig buitenlucht te bemonsteren vanaf één centraal punt voor de beide opstellingen



(voor referentiemeetlijn én vegetatiemeetlijn). Deze lijn was ook aangesloten op het kleppensysteem en heeft gedurende de helft van de meetperiode meegedraaid in de cyclus om eventuele offsets tussen beide monitoren te kunnen bepalen.

## 2.2 Metingen vegetatie

### 2.2.1 De karakterisering van de vegetatie

De vegetatie is op 28 mei 2008 gekarakteriseerd. Bij deze karakterisering is een vegetatieopname gemaakt van de berm (begroeiing tussen vluchtstrook tot singel), de singel en het stuk van de singel tot het sloottalud. De soorten zijn benoemd en de bedekkingsgraad is in beeld gebracht volgens de methode van Braun-Blanquet (1964). Voor deze opname is een stuk van 40 meter lang en ongeveer 28 meter breed gekarakteriseerd. Het in kaart gebrachte stuk lag rondom de meetmast, tussen de witte piketten in Figuur 4.1.

### 2.2.2 De optische porositeit van de vegetatie

Het verminderen van concentraties uit de lucht door het daadwerkelijk wegvangen/verwijderen van componenten door de vegetatie, verloopt alleen als er contact is tussen de bladeren en de componenten in de lucht. Dit contact wordt beïnvloed door de afmeting en (optische) porositeit van de vegetatie (Wesseling *et al.* 2004). De hoogte en de breedte bepalen hoeveel "biofilter" er aanwezig is en daarmee de contacttijd tussen blad en verontreiniging. Een zekere (optische) porositeit is nodig om de luchtbeweging in de vegetatie in stand te houden. De windsnelheid moet bij het binnentreden van de vegetatie afgeremd worden zodat zowel de absorptie (gasopname) als adsorptie (fijn stof depositie) kan plaatsvinden. De windsnelheid mag niet tot nul gereduceerd worden omdat er dan geen nieuwe lucht de vegetatie kan binnen treden en alle aankomende lucht over de vegetatie heen gestuwd wordt. Een porositeit van 20% wordt gezien als optimaal voor het afvangen van deeltjes >30 nm (Raupach *et al.* 2001). Bij hogere porositeit is de extra turbulente veroorzaakt door de vegetatie wel minder, waardoor de concentratievermindering benedenwinds van de vegetatie minder sterk is dan bij een lage porositeit.

De (optische) porositeit wordt bepaald door met beeldanalyse de open vlakken in de vegetatie te bepalen (Loeffler *et al.* 1992). De porositeitsmetingen worden aan het begin van iedere meetsessie uitgevoerd. Foto's van het vooraanzicht van de vegetatie worden geanalyseerd met een aangepaste versie van het beeldverwerkingsprogramma ImageJ (voor meer info hierover zie: [www.rsb.info.nih.gov](http://www.rsb.info.nih.gov)). Met deze beeldverwerkingstechniek worden de "groene/bruine" gewasdelen van de singel gescheiden van de homogene achtergrondkleur van de lucht. Het percentage pixels van de lucht wordt gerelateerd aan het totale aantal pixels tot de porositeit van de vegetatie.

### 2.2.3 Het LAD profiel van de vegetatie

Op 5 juni 2008 is de bladbezetting (Leaf Area Density, LAD) op diverse hoogtes in de vegetatie bepaald. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een lichtmeter voor het fotosynthetische licht (400-700 nm, LI-COR, model LI-190SA; Lincoln USA). Op 5 juni is op 10 doorsneden van de singel op 5 posities op iedere doorsnede, en per positie 5 hoogtes, het lichtniveau bepaald en gerelateerd aan de referentiemeting buiten de opstand. De lichtonderschepping is uitgerekend en daarmee de LAI per laag volgens Goudriaan (Goudriaan & van Laar, 1994). De metingen worden uitgevoerd op een egaal bewolkte dag (Goudriaan, 1977). Op 26 november 2008 is de lichtonderschepping van de kale takken van het aanwezige loofhout bepaald op dezelfde wijze als voor de vegetatie in blad. Hiermee is de stem area density uitgerekend op dezelfde wijze als de LAD. De maximale waarde voor de stem area density wordt geschat op 1 (Wesseling *et al.*, 2004). Aan het einde van iedere meetsessie wordt een schatting gemaakt van de veranderingen in LAD.

### 2.2.4 De geleidbaarheid van de huidmondjes en de pF-curve

De vegetatie neemt gasvormige luchtverontreiniging op via de huidmondjes. Gewassen met brede, dunne bladeren met veel huidmondjes zijn bij uitstek geschikt voor het opnemen van gasvormige componenten, zoals b.v. NO<sub>2</sub> (Tonneijck & Blom-Zandstra 2002). Dit zijn in het algemeen loofbomen. Voor NO<sub>2</sub> geldt bijvoorbeeld, dat de hoeveelheid die kan worden opgenomen, sterk samenhangt met de hoeveelheid bladoppervlak per volume eenheid. Meer blad neemt meer op (Okano *et al.* 1988). De huidmondjesweerstand is eveneens belangrijk; hoe lager de weerstand, d.w.z. hoe groter de geleidbaarheid, hoe groter de opname. Als de huidmondjes ver open staan is de weerstand laag en de geleidbaarheid hoog. De huidmondjes staan in principe open om kooldioxide op te nemen voor de groei van het gewas. Omdat voor de groei van het gewas licht nodig is, staan de huidmondjes in ieder geval overdag open. Door straling op het bladerdek

warmt het op. Het gewas streeft ernaar om niet te warm te worden en om de temperatuur constant te houden verdampt het water. Dit water wordt via de wortels aangevuld. Is de aanvulling onvoldoende om de verdamping te compenseren dan sluit de plant de huidmondjes en wordt noch kooldioxide noch gasvormige luchtverontreiniging opgenomen. Er zijn twee mogelijke mechanismen die tot het sluiten van de huidmondjes leiden. De verdamping is erg groot en daarmee de vraag naar water eveneens en dan kan de capaciteit van de wortels onvoldoende zijn om aan de vraag te voldoen. Ook kan de capaciteit van de wortels voldoende zijn, terwijl er onvoldoende water beschikbaar is. Deze tweede situatie treedt op afhankelijk van de hoeveelheid neerslag en de kenmerken van de bodem. Deze kenmerken van de bodem zijn hier dan ook bepaald. Hiervoor is op 11 juli 2008 het bodemprofiel vastgesteld, van de gevonden bodemlagen is de granulaire samenstelling onderzocht en de pF-curve berekend met de Van Genuchten parameters (Van Genuchten 1980; Woesten *et al.* 2001).

Tevens is op 19 juni 2008 de geleidbaarheid van de huidmondjes bepaald. Hiervoor werd met een Delta-T Porometer AP4 ([www.delta-t.co.uk](http://www.delta-t.co.uk)) op ongeveer 3 meter hoogte in het gewas de geleidbaarheid bepaald in de houtige gewassen eik en es. Er zijn aan ieder gewas drie meetseries uitgevoerd waarbij 1 meetserie bestond uit 10 metingen.



## 3. Modelopzet PanAir

### 3.1 Doel modelberekeningen

Het doel van de CFD-modellering is een precieze kwantificering van het vegetatie-effect op de luchtkwaliteit langs de snelweg. Het vegetatie-effect wordt door een aantal factoren bepaald die samenhangen met de veranderende stroming rond de vegetatie en door de depositie van deeltjes en gassen in de vegetatie. In dit onderzoek is met CFD-berekeningen het effect van beide processen bepaald. Om de betrouwbaarheid van de modelresultaten te bepalen, zijn gemodelleerde NO<sub>x</sub> en fijn stof concentraties vergeleken met een selectie uit de metingen. Het betreft hier een eenvoudige vergelijking waarbij de gemeten concentraties op de meetpunten zijn vergeleken met de in het model berekende concentraties. De geselecteerde meetperiode waarmee de modelresultaten zijn vergeleken is 26 juni 2008 van 13 tot 16 uur. Deze periode wordt later in dit rapport ook wel de standaard situatie genoemd. Gedurende deze periode was de wind relatief constant uit zuidwestelijke richting en waren de verkeersintensiteiten hoog. Onder deze omstandigheden verwachten we daarom een maximaal vegetatie-effect. Tenslotte zijn er gevoeligheidsstudies uitgevoerd ten opzichte van de standaard situatie om inzicht te krijgen in de onzekerheid van de modelresultaten, maar ook om de oorzaken en de grootte van het vegetatie-effect te bepalen.

### 3.2 Modelbeschrijving

De berekeningen zijn uitgevoerd met het CFD model Fluidyn PANAIR, versie 3.3.5 ([www.fluidyn.com](http://www.fluidyn.com)), kortweg PANAIR. PANAIR is ontwikkeld door de TRANSOFT Group en maakt deel uit van een familie van verschillende CFD-codes. Fluidyn-PANAIR is een geavanceerd 3-D model om op hoge ruimtelijke resolutie luchtkwaliteitsberekeningen te doen voor het stedelijke gebied. PANAIR simuleert de verspreiding van luchtvervuiling voor verschillende meteorologische omstandigheden. Dit hoofdstuk geeft een kort algemeen overzicht van PanAir. Hoofdstuk 3.3 beschrijft de modelopzet die is gebruikt voor het onderzoek.

#### 3.2.1 Instellingen voor het terrein

Het model houdt gedetailleerd rekening met het terrein. De details van het terrein worden door de gebruiker opgegeven. Het onderscheidt hoogteverschillen (in te voeren als hoogtelijnen), gebouwen, vegetatie, open veld, bos of wateroppervlakken. De domeingrootte moet worden opgegeven. Oppervlakteruwheden zijn gegeven voor verschillende veldtypes (grasland, woestijn e.d.), maar kunnen ook handmatig worden ingesteld. De locatie van het terrein moet opgegeven worden om de instraling van de zon te kunnen berekenen. Vervolgens kunnen objecten zoals gebouwen en geluidsschermen geplaatst worden in het domein.

#### 3.2.2 Instellingen voor de vegetatie

Boomhoogte, stamhoogte, Leaf Area Density (LAD) in het stamgebied en in het kroongedeelte bepalen de vegetatie. De wrijvingscoëfficiënt waarmee de afremming van de luchtstroom berekend wordt op basis van de LAD moet ook worden ingevoerd.

#### 3.2.3 Meteorologie

PANAIR bevat een microschaal meteorologisch model om de atmosferische condities te berekenen. De grootschalige meteorologische parameters moeten door de gebruiker worden opgegeven.

#### 3.2.4 Bronnen

PANAIR beschikt over een uitgebreide chemische database waarin verontreinigende stoffen met hun chemische eigenschappen zijn opgenomen. Ook aerosolen maken deel uit van het model: sulfaat, lood en elementair koolstof in de verdeling PM1, PM2.5, PM5 en PM10. PANAIR beschikt over de mogelijkheden om in hoog detail broneigenschappen te beschrijven (sterkte, hoogte, tijdvariatie, warmteuitstoot, impulsuitstoot, uitstootrichting, etc..).

### 3.2.5 Chemie

Het model beschikt over een module om eenvoudig chemische omzettingen in te voeren en aan te passen.

### 3.2.6 Depositie

PANAIR berekent de depositie op basis van vegetatie- en stofeigenschappen. Deze gegevens zijn door de gebruiker aan te passen.

### 3.2.7 Ruimtelijke resolutie

PANAIR is geschikt voor de lokale tot de middelgrote schaal (van ~100x100m tot ~50x50km), waarbij de fijnheid van het rekenrooster wordt aangepast. Voor de lokale schaal is de resolutie van de orde 1 – 10 meter. Het rekenrooster is onregelmatig en wordt door het model zelf bepaald (fijner rond obstakels en grover aan de randen). De gebruiker kan instellen in welke mate het model het rooster oprekt en tot welke resolutie. Het rekenrooster kan nadien handmatig worden aangepast.

### 3.2.8 Tijdintegratie

De algemene code is in staat in de tijd te integreren, maar voor continue bronnen zoals bij luchtverontreiniging heeft het de voorkeur de stationaire toestand uit te rekenen. Voor variabele bronnen zoals bijvoorbeeld verkeer, kan het model van uur tot uur de stationaire toestand uitrekenen. Het is ook mogelijk over alle windrichtingen te rekenen en dan met behulp van windstatistiek jaargemiddelde concentraties uit te rekenen.

## 3.3 Modelopzet A50 Vaassen

### 3.3.1 Locatie en modelconfiguratie

Figuur 3.1 toont de locatie van de gemodelleerde vegetatiestrook, de ligging van de rijbanen, en de CFD-monitorpunten. De modelconfiguratie is onder andere op een luchtfoto uit Google Maps gebaseerd. Deze wordt in de achtergrond getoond. De snelweg is als twee lijnbronnen gesimuleerd en de vegetatie die loodrecht op de vegetatiestrook langs de snelweg staat, is ook meegenomen in het modelonderzoek. Het totale rekendomein is 698 m in de oost-west richting, 941 m in de noord-zuid richting en 150 m in de verticaal.



Figuur 3.1 *Locatie van de vegetatiestrook, ligging van de rijbanen en de CFD-monitorpunten*

### 3.3.2 Vegetatiekenmerken

De metingen van de vegetatiestrook, de typering en ligging, zijn gebruikt om de modelconfiguratie op te zetten. Op grond van de metingen die in de zomer hebben plaatsgevonden is de vegetatie gemodelleerd als drie lagen. De hoogte, de breedte en de LAD van deze lagen zijn in Tabel 3.1 weergegeven.

Tabel 3.1 Modelwaardes voor de vegetatiestrook.

Laag	breedte	LAD (zomer)	LAD (winter)
0-3 m	4 m	0.2	0.06
3-5 m	4 m	0.3	0.04
5-13.5 m	8 m	0.6	0.1

De afremming van de stroming en de toename van turbulentie door vegetatie wordt door PanAir berekend met een wrijvingskracht. Deze is afhankelijk van de LAD en de wrijvingscoëfficiënt waarvoor een waarde van 0.2 is aangenomen (Liu et al., 1996).

De depositiesnelheid van sporegassen en ultrafijne deeltjes wordt beïnvloed door concentratieveranderingen ten gevolge van de afremming van de stroming en de toename van turbulentie. Voor PM<sub>10</sub> is een depositiesnelheid van 0.01 cm/s verondersteld en voor NO<sub>2</sub> 0.2 cm/s. Dit zijn hoge schattingen op grond van metingen van Janssen et al. (2008). De depositiesnelheid van NO is nul.

### 3.3.3 Monitorpunten

De locaties van de monitorpunten waarvoor de concentraties zijn gesimuleerd (Figuur 3.1) komen deels overeen met de meetlocaties. De CFD monitorpunten staan op 3, 13, 24, 38, 47 en 88 meter van de weg en registreren de gemodelleerde concentraties op een hoogte van 1,5 m.

### 3.3.4 Meteorologie

De berekeningen zijn uitgevoerd op grond van windmetingen voor de periode 26 juni 2008 van 13 tot 16 uur. De gemiddelde windsnelheid op het achtergrondstation (2 m hoogte) ten westen van de snelweg was op dat moment 3,5 m/s en de windrichting 240°.

Aangezien de windsnelheid in de geselecteerde periode relatief hoog was, is er in de berekeningen rekening gehouden met neutrale condities. In PANAIR dat beschikt over een meteorologisch model is dit gedaan door de temperatuur voor te schrijven met een vast verticaal profiel en een temperatuurgradient van -0.01 K/m. Hierdoor wordt de Monin-Obokhov lengte oneindig.

De ruwheidslengte in het voorland is voorgeschreven. Hiervoor is de waarde  $z_0=0.03$  m gekozen: een waarde voor ongemaaid grasland.

### 3.3.5 Turbulentiemodel

Bij de gekozen windsnelheid is de stroming turbulent. Voor deze condities is in Pan-Air het k-ε model het meeste geschikte turbulentiemodel.

### 3.3.6 Verkeersemisssies

De verkeersemisssies zijn gemodelleerd als aparte oppervlaktebronnen voor iedere rijstrook. De verkeersintensiteiten waarvan de emissies zijn afgeleid, zijn geleverd door de opdrachtgever (zie

Tabel 3.2). Daarnaast is gebruik gemaakt van de verkeersemisssiefactoren die door het PBL zijn gepubliceerd voor 2008. Deze zijn ook in

Tabel 3.2 weergegeven.

De totale emissies op de snelweg worden hierdoor 5236 g/km/uur voor NO, 610 g/km/uur voor NO<sub>2</sub> en 365 g/km/uur voor PM<sub>10</sub>. Deze emissies zijn evenredig verdeeld over de twee rijrichtingen.

Tabel 3.2 Verkeersgegevens (periode 26 juni 2008 van 13 tot 16 uur) en emissiefactoren (2008)

Verkeerstype	Snelheid (km/uur)	Intensiteit (aantal per uur)	NO (g/km)	PM <sub>10</sub> (g/km)	NO <sub>2</sub> (g/km)
personen	111	15611	0.28	0.047	0.085
middelzwaar	97	1681	4.77	0.224	0.317
zwaar	81	1609	5.3	0.218	0.359

### 3.3.7 Achtergrondconcentraties

Bij de berekeningen is rekening gehouden met de achtergrondconcentraties zoals gemeten op het achtergrondstation. Voor de periode 26 juni 2008 van 13 tot 16 uur was PM<sub>10</sub> 21.0 µg/m<sup>3</sup>, NO 1.2 µg/m<sup>3</sup> en NO<sub>2</sub> 8.7 µg/m<sup>3</sup>.

### 3.3.8 Turbulentie door verkeer

Panair is in tegenstelling tot wat er in het ontwikkelingsrapport was beschreven niet voorzien in de mogelijkheid turbulentie door het verkeer mee te nemen. Daarom is een andere manier gezocht om turbulentie direct als een bron toe te voegen in de CFD-simulatie. De beste benadering is gevonden door op de rijbaan een groot aantal puntbronnen te plaatsen die lucht omhoog blazen.

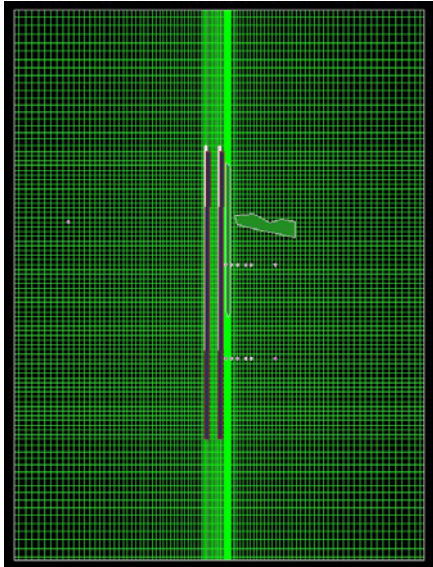
### 3.3.9 Mesh

PANAIR genereert automatisch een mesh, gegeven de modelconfiguratie. Het horizontale mesh wordt getoond in Figuur 3.2. De afmetingen van het mesh zijn 119 cellen in de x-richting, 98 cellen in de y-richting en 78 cellen in de z-richting. In totaal zijn dit ongeveer 1 miljoen cellen.

### 3.3.10 Chemie

Chemische reacties zijn in de modelberekeningen niet meegenomen. De omzetting van NO naar NO<sub>2</sub> en het effect van inmening van ozon uit hogere luchtlagen door de aanwezigheid van de vegetatiestrook zijn dus niet onderzocht, waardoor de berekende NO<sub>2</sub> concentraties altijd een onderschatting is zijn. Immers door het inmengen van ozon zal NO<sub>2</sub> worden gevormd door reactie van NO met Ozon.

De verspreidingsberekeningen worden echter wel afzonderlijk uitgevoerd voor NO en NO<sub>2</sub>, omdat de emissiesterktes en de depositiesnelheid (paragraaf 3.3.2) van deze stoffen verschillend zijn (zie Tabel 3.2). De berekeningen moeten daarom voor beide stoffen apart worden uitgevoerd. Vervolgens worden beide concentratieberekeningen bij elkaar opgeteld om de totale NO<sub>x</sub> concentratie te bepalen. De NO<sub>x</sub> concentraties zijn daardoor dus goed berekend. De afzonderlijke waarden van NO en NO<sub>2</sub> hebben dus minder betekenis.



Figuur 3.2 Modelconfiguratie met het horizontale grid. Het grid is zeer dicht rond de vegetatiestrook.





## 4. Resultaten en discussie: Metingen

### 4.1 Metingen Vegetatie

#### 4.1.1 De karakterisering van de vegetatie

De berm is ongeveer 6 meter breed en bestaat voornamelijk uit grassen, kruiden en enkele vlinderbloemigen (zie voor een detail van de gewassen bijlage A). De vegetatie in de berm is 0,30 tot 0,60 m hoog. De bedekking van de vegetatie in de berm is 92%. De singel is vervolgens 4 meter breed aan de voet, uitlopend naar 8 meter breed in de kruin. De singel heeft een kruidlaag (tot 0,3 meter hoog) met enkele grassen, kruiden en opslag van eenstijlige meidoorn (*Crataegus monogyna*), een enkele sleedoom (*Prunus spinosa*), roos en gewone braam. De bedekkingsgraad van de kruidlaag in de singel is 30%. De struikenlaag (tot 3 meter hoogte) bestaat voornamelijk uit opslag van sleedoom, een enkele es (*Fraxinus excelsior*) en zomereik (*Quercus robur*), en gewone braam. De struiklaag heeft een bedekkingsgraad van 90%. De bomenlaag is gemiddeld 13,5 meter hoog met een maximale hoogte van een enkele individuele boom van 15 meter. De bomen zijn oorspronkelijk in 4 rijen aangepland maar door dunning is er geen sprake van strakke rijen. De bomenlaag bestaat uit es en zomereik. De kronen zorgen voor een onregelmatig oppervlak aan de wegzijde, de weilandzijde en de bovenzijde. Tussen de kruidlaag en de kroon is een vrij open laag in de singel, zie Figuur 4.1.

#### 4.1.2 De optische porositeit

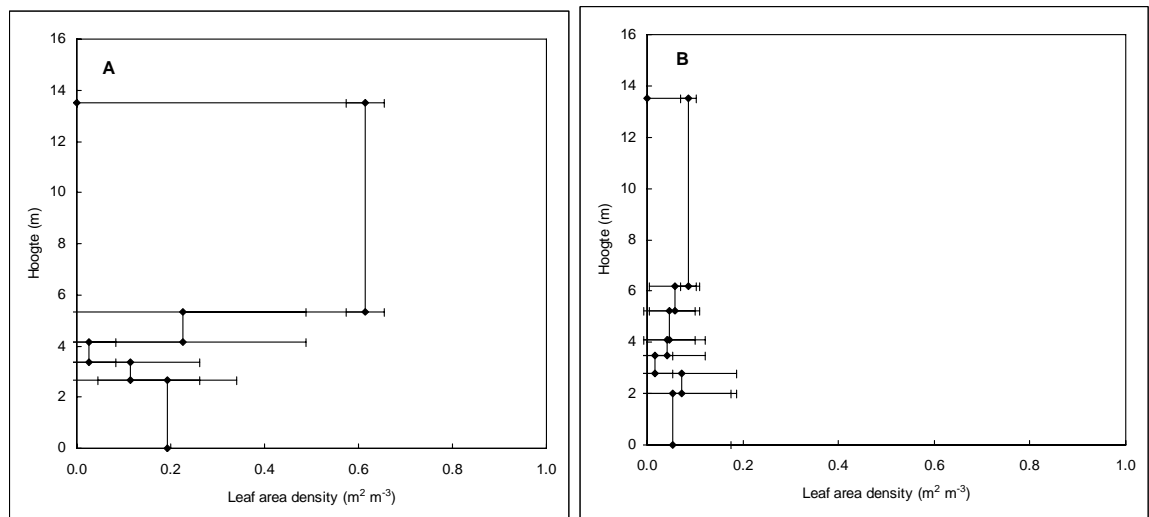
De optische porositeit van de vegetatie was op 29 mei 2008 19,2% (s.e. = 2.1) en op 11 juli 2008 19,5% (s.e. = 2.3). De vegetatie van de singel is echter niet homogeen verdeeld, zie Figuur 4.1. Onder de bomenkruin bevindt zich een relatief dun bebladerd stuk dat soms tot aan het grondoppervlak open kan zijn.



Figuur 4.1 Een vooraanzicht van de singel op 27 juni 2008.

#### 4.1.3 Het leaf area density (LAD) profiel

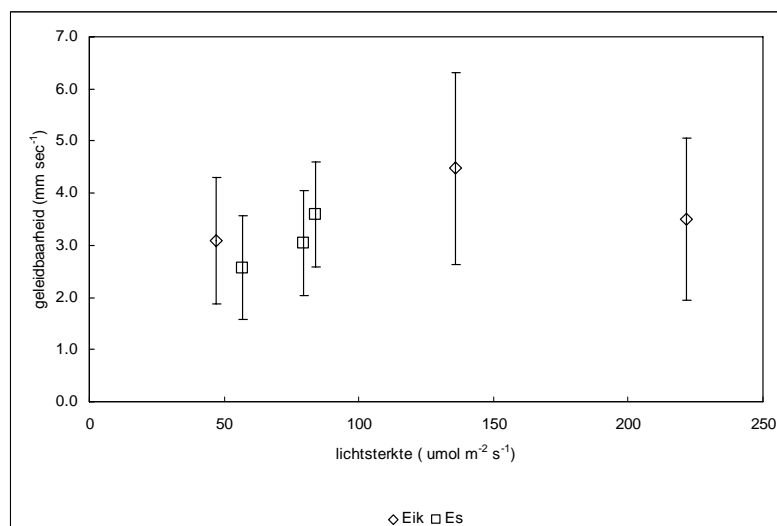
De LAD van de singel op 5 juni 2009 was maximaal  $0,6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$  in de kroon en beduidend lager in de onderste helft van de singel Figuur 4.2A. Vooral het stuk tussen kruidlaag en kroon is open en heeft een lage LAD. Na de bladval in november is de hoeveelheid oppervlak beduidend lager en varieert van  $0,09 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$  in de kroon tot  $0,01 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$  in de kruidlaag, zie Figuur 4.2B.



Figuur 4.2 Het gemeten leaf area density profiel op 5 juni (A) en na bladval op 26 november (B)

#### 4.1.4 De geleidbaarheid van de huidmondjes en de pF-curve

De geleidbaarheid van de huidmondjes van es en eik lagen op 17 juni rond de 3 tot 5 mm sec<sup>-1</sup> (Figuur 4.3). In de literatuur wordt een waarde voor es van 3,5 mm sec<sup>-1</sup> gevonden en voor eik van 0,9 tot 2,9 mm sec<sup>-1</sup> (Breuer *et al.* 2003). De gemeten waarden geven aan dat de huidmondjes normaal functioneerden en geen vochttekort ondervonden.

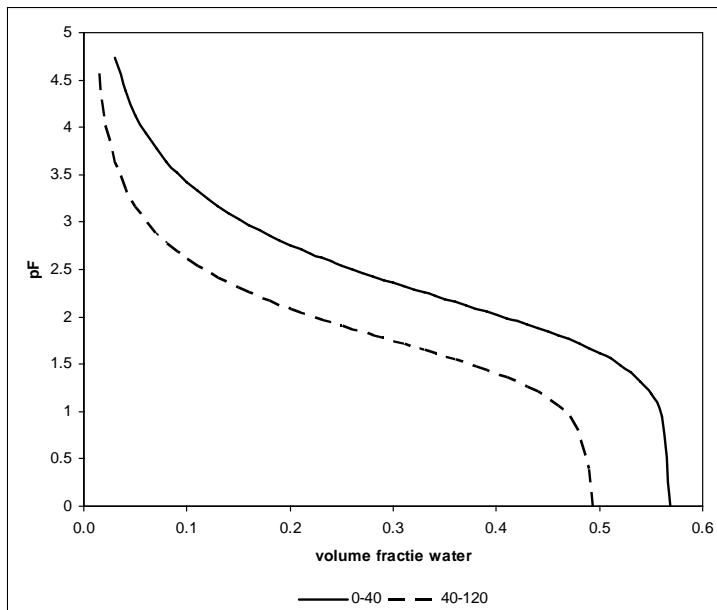


Figuur 4.3 De geleidbaarheid van de huidmondjes van eik en es op 17 juni 2008

De bodem bestaat uit twee lagen, 0-0,40 m en 0,4-1,2 m. De bovenste laag is een vruchtbare teeltlaag terwijl de onderste laag zeer heterogeen is met soms ijzerhoudende delen. In de teeltlaag kwamen veel wortels voor maar ook op 1,2 m diep werd een laag met wortels aangetroffen. Tijdens de bemonstering op 11 juli was de grond zeer droog. De granulaire samenstelling geeft aan dat het om zandgrond gaat. De grafische voorstelling van de verhouding tussen het vochtgehalte in de bodem en de logaritmische functie van de bodempotentiaal staat in Figuur 4.4 (pF-curve). De bodem is op veldcapaciteit bij pF=2, als de bodempotentiaal -100 cm is. Als de bodem droger wordt komt er een moment dat de plant de huidmondjes dicht gaat doen, waardoor groeiremming optreedt, maar bij kleine veranderingen in de klimatologische omstandigheden (b.v. even geen directe zonnestraling), kunnen de huidmondjes snel weer open gaan. Dit potentiaal is gewasspecifiek. Bij een pF van 3,2 ervaren de meeste gewassen een behoorlijke waterstress en zijn de huidmondjes volledig gesloten maar herstelt het gewas zich als het gaat regenen. Neemt de potentiaal toe tot pF=4,2 dan is het permanente verwelkingspunt bereikt en gaat het gewas dood.

De volumefractie water tussen een pF van 2 en 3,2 wordt het gemakkelijk beschikbaar water genoemd en is een maat voor de periode dat een gewas zonder neerslag kan. Voor de opname van gassen uit de lucht moeten de huidmondjes open staan en is het belangrijk dat het gewas voldoende watervoorraad heeft in de periode dat het niet regent. De

hoeveelheid gemakkelijk beschikbaar water bedraagt 28,5 vol% voor de bovenste laag en 18 vol% voor de laag onderste laag. De totale hoeveelheid beschikbaar water (pF=2 tot pF=4,2) bedraagt voor de bovenste laag 36vol.% en 20,5vol.% voor de onderste laag. De hoeveelheden voor de bovenste laag zijn hoger dan doorgaans voor landbouwgronden wordt gevonden (Kuipers, 1976).

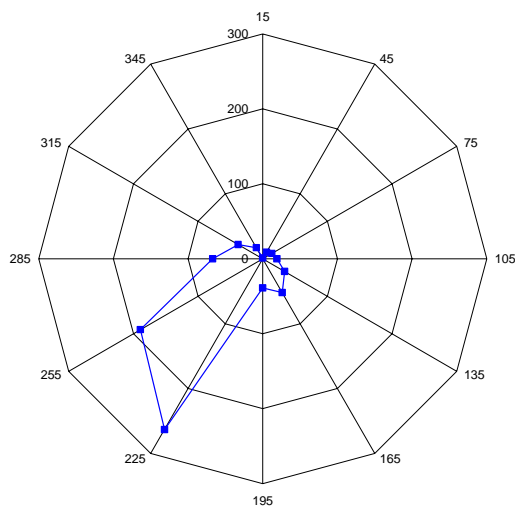


Figuur 4.4 De pF-curve van de beide bodemlagen

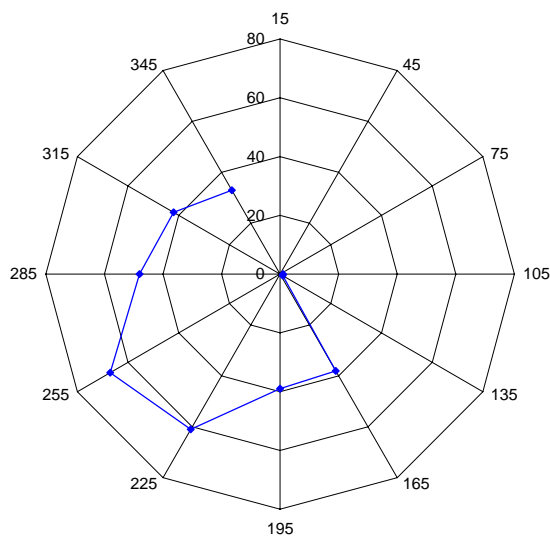
## 4.2 Metingen Luchtkwaliteit

### 4.2.1 Algemeen

In de bemeten zes weken in de zomercampagne is continu gemeten, hetgeen een groot aantal datapunten heeft opgeleverd. In de wintercampagne van 2 weken is ook continu bemonsterd. De resultaten zijn voor de interpretatie eerst gemiddeld naar uurlijkse waarden. In Figuur 4.5 en Figuur 4.6 zijn het aantal uurlijkse datapunten weergegeven bij de betreffende windrichting op de achtergrondlocatie voor respectievelijk zomer- en wintercampagne. Voor de zomer is te zien dat in de richting zuid/zuidwest veel data beschikbaar is. De windrichting waarin de data geanalyseerd is, is 210 tot 270 graden. De reden om in deze windrichting te analyseren en niet loodrecht op de weg, is dat het aggregaat een mogelijke invloed gehad heeft in de noord-west component, omdat deze ten noorden van de meetopstelling was opgesteld. In dit bereik van 210-270 graden is 62% van de data over de gehele periode beschikbaar. In de wintercampagne is de wind 48% van de tijd west geweest en hier is 225-315 graden aangehouden voor data-analyse, mede doordat hier geen invloed meer van het aggregaat aanwezig kan zijn geweest, doordat deze ten oosten van de meetopstelling was geplaatst. In Bijlage B is een samenvatting gegeven van de meteorologische gegevens van de zomer- en wintercampagne.



Figuur 4.5 Aantal uren met beschikbare gegevens gedurende de zomercampagne voor de betreffende windrichting op de achtergrondlocatie



Figuur 4.6 Aantal uren met beschikbare gegevens gedurende de wintercampagne voor de betreffende windrichting op de achtergrondlocatie

#### 4.2.2 Metingen NO/NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>

##### Correcties NO<sub>x</sub> data

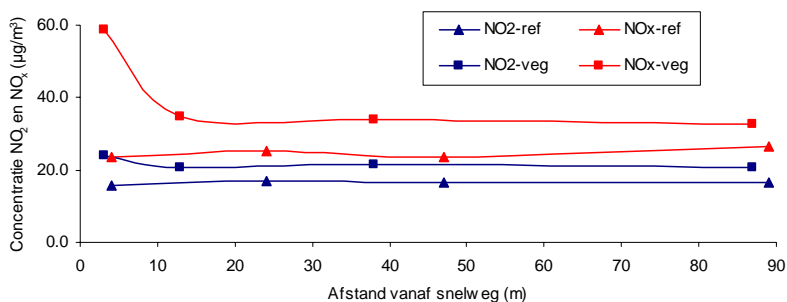
De ruwe data van de metingen laten in de zomer- en wintercampagne grote verschillen zien tussen de vegetatielijn en referentielijn. De concentratiegradiënten gemeten bij oostenwind tonen dit verschil al deels aan (zie ook Figuur 4.7). Na de campagnes zijn de gebruikte CLD 700 monitoren getest en deze laten naast elkaar bij metingen in dezelfde ruimte ook grote verschillen zien. Deze variaties treden vooral op in de NO-waarden, de offset varieert met de tijd en het verschil tussen twee monitoren kan positief en negatief zijn. De verschillen bedragen afhankelijk van de periode ongeveer 30-100%. Kalibratie van deze monitoren voor en na de campagne blijkt dus niet voldoende te zijn. De verschillen zijn het grootst in de (ambient) concentratierange van 10-100 ppb. Daarboven nemen de verschillen sterk af.

In de verwerking van de data heeft daarom zo goed mogelijk een extra schaling plaatsgevonden naast de kalibratie-correctiefactor.

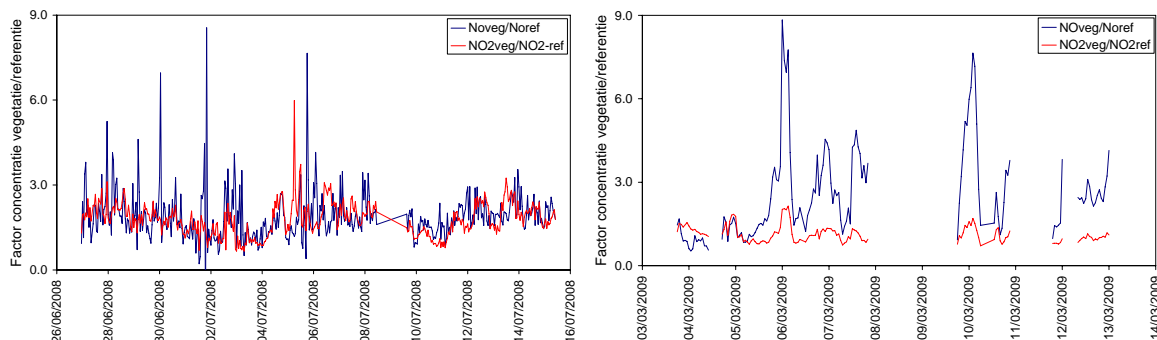
In eerste instantie is de mogelijkheid bekeken om een correctiefactor mee te nemen door gebruik te maken van de data bij oostenwind. Deze correctie bleek niet voldoende om in het windbereik van 210-270 graden naar elkaar geschaalde concentraties te krijgen. Meer realistisch lijkt het om gebruik te maken van de data van de referentieleidingen. Dit zijn twee leidingen met eenzelfde lengte die vanaf dezelfde plek, aan de weg (afstand is 4m), zonder vegetatie, naar de twee verschillende monitoren wordt geleid. De verhouding van de concentraties van de monitoren die in de referentielijn en vegetatielijn hebben gestaan is bepaald. Figuren 4.8A en B laten deze verhouding zien. Duidelijk is dat er grote verschillen kunnen optreden, dit is wel voornamelijk in de nachten wanneer lage concentraties worden waargenomen. In de zomercampagne zijn deze leidingen pas halverwege de campagne aangelegd en zijn correcties dus niet voor de volle periode beschikbaar. In de wintercampagne is ook niet continue een vergelijking beschikbaar door uitval van de monitor aan de vegetatiezijde.

De uiteindelijke correctie is toegepast door deze gemeten verhouding tijdsafhankelijk te berekenen. Voor het eerste deel van de zomercampagne is, bij afwezigheid van deze gegevens, hiervoor het gemiddelde van de navolgende periode genomen. Dit gemiddelde is bepaald voor de betreffende windrichting 210-270° graden (zomer) en 225-315° (winter) en tijd (spits: 6-9uur en 16-19uur), waarin ook de concentraties zijn bepaald. In de hierna volgende gegevens zijn de correctiefactoren steeds verwerkt.

Gezien de grote onzekerheid in de correctiefactoren is het helaas niet mogelijk om op grond van onze metingen betrouwbare uitspraken te doen bij vergelijking van de absolute concentraties op gelijke afstanden van de weg tussen referentie- en vegetatiemetingen. Om dit mogelijk te maken bij deze meetopzet is regelmatige (meermalen per dag) on-site kalibratie van alle systemen noodzakelijk, per voorkeur volautomatisch.

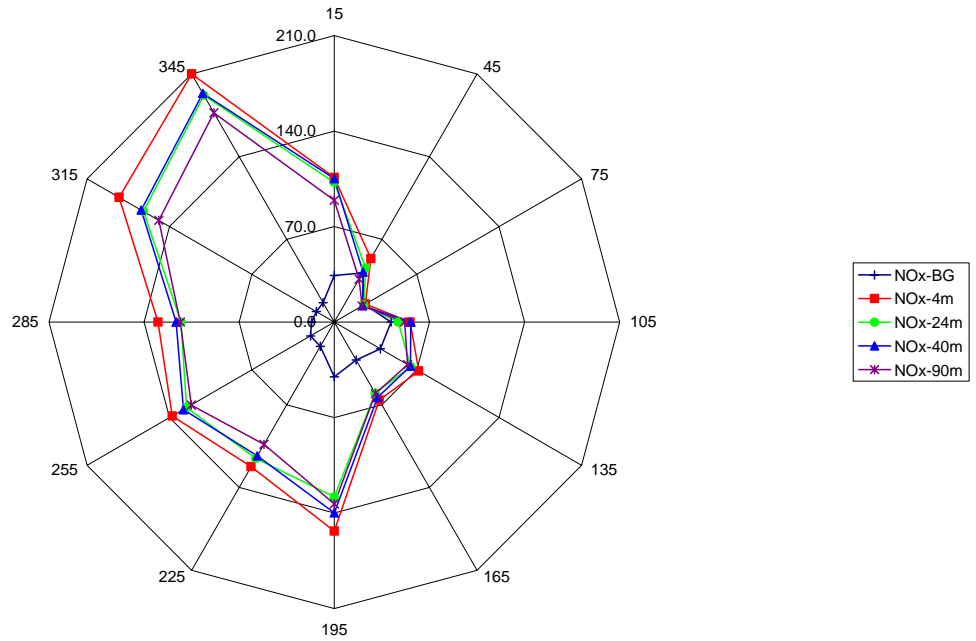


Figuur 4.7 Concentratiegradiënten met een oostenwind: een windrichting tussen 60 en 120 graden.

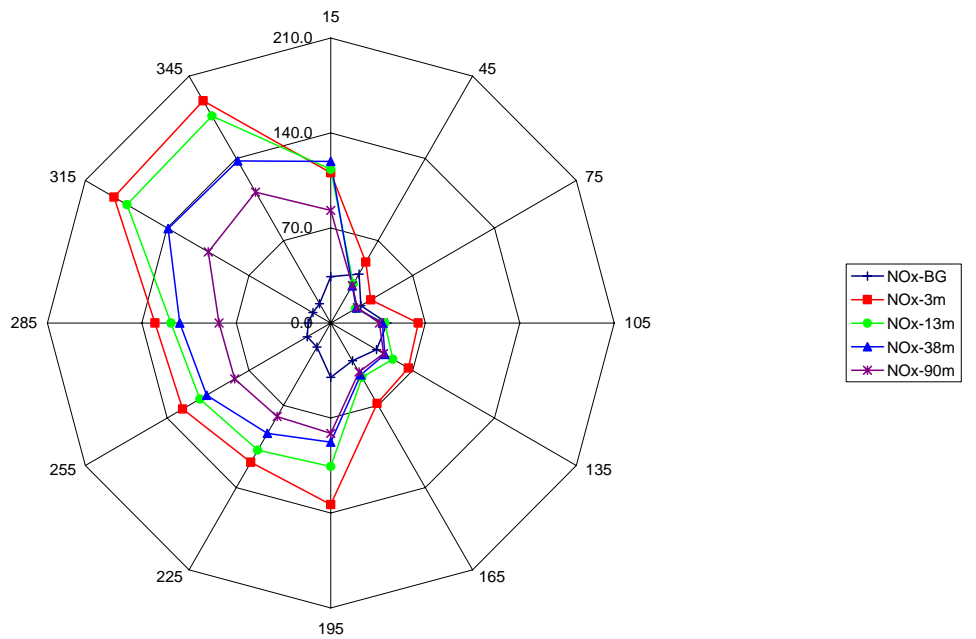


Figuur 4.8A en B Referentieleidingen: factoren voor de verhouding tussen NO en NO<sub>2</sub> voor vegetatie en referentie, uitgezet voor de zomer- (links) en wintercampagne (rechts)

In de onderstaande windrozen (zie Figuur 4.9 en Figuur 4.10) zijn van de referentiezijde en van de vegetatiezijde de concentraties van NO<sub>x</sub> weergegeven in µg/m<sup>3</sup> op de verschillende afstanden. Daarnaast is ook de concentratie op het achtergrondstation weergegeven. De concentratiedata zijn gemiddelde uurwaarden en voor de windrichting is de winddata van het achtergrondstation gebruikt. In beide figuren is te zien dat de hoogste NO<sub>x</sub>-concentraties gevonden worden op de punten die het dichtst bij de weg liggen aan de lijzijde van de weg. Ook zijn de gradiënten bij deze windrichting het sterkst.



Figuur 4.9 Windroos referentielijn: gradiënten van  $\text{NO}_x$ -concentraties ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )



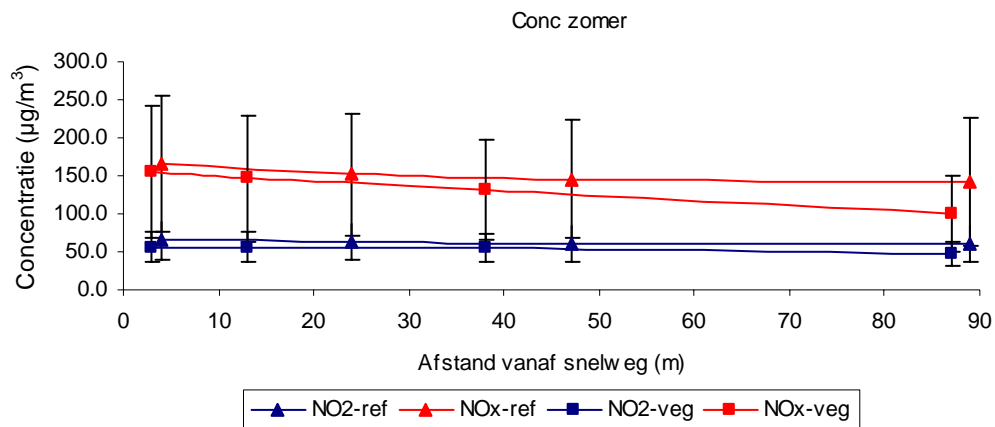
Figuur 4.10 Windroos vegetatielijn: gradiënten van  $\text{NO}_x$ -concentraties ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Hierna volgen meerdere figuren met concentratiegradiënten waarbij vermeld moet worden dat hier een aantal selecties meegenomen worden, namelijk de windrichting van 210-270 graden en 225-315 graden voor zomer en wintercampagne respectievelijk. Daarnaast is een selectie genomen van grootste drukte op de weg, hierbij is gekeken naar tijden van 6-9 uur en van 16-19 uur.

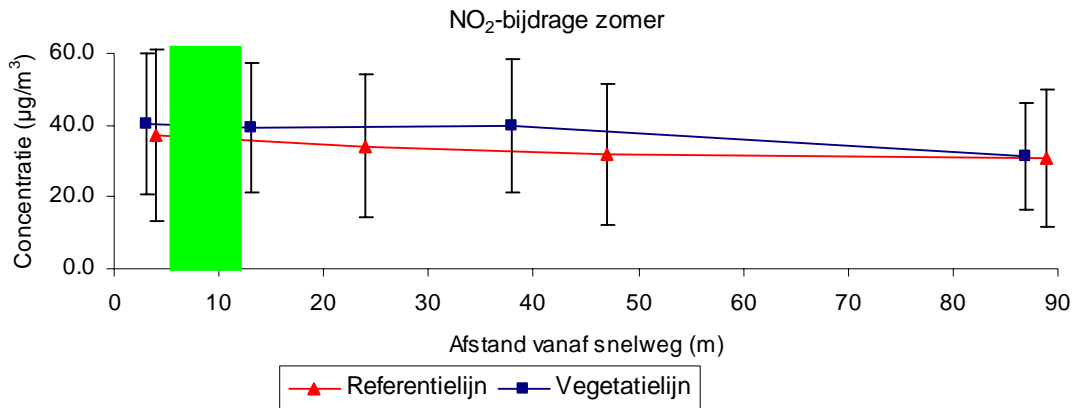
Concentratiegradiënten voor  $\text{NO}_x$  en  $\text{NO}_2$  tegen de afstand tot de weg zijn uitgezet in Figuur 4.11 en Figuur 4.16 voor de zomer- en wintercampagne respectievelijk. Hierin is voor de spreiding per punt de standaarddeviatie genomen.

In de zomer liggen de concentraties van NO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> op alle punten vanaf de weg op de referentielijn boven die van de vegetatielijn, maar dit verschil is niet significant door de hoge standaarddeviatie van de gemiddelde concentraties en gezien de onzekerheid in de toegepaste correctiefactoren. Voor NO<sub>x</sub> is de gradiënt achter de vegetatie zelfs sterker met de afstand, achter de vegetatie treedt dus een sterkere verdunning op. De wegbijdragen van de concentraties laten een minder eenduidig beeld zien (Figuur 4.12 en Figuur 4.13). Hier zijn namelijk de NO<sub>2</sub>-bijdragen op de vegetatielijn hoger dan die van de referentielijn. Op 90m is de NO<sub>2</sub> bijdrage achter de vegetatie 2% hoger in vergelijking met de referentie op dezelfde afstand. De wegbijdragen voor NO<sub>x</sub> zijn in de gradient bijna gelijk tot aan 90m, waar de NO<sub>x</sub>-bijdrage 32% lager is op de vegetatielijn dan op de referentielijn. Ook correlaties van referentie en vegetatielijn laten verschillen zien op 90m vanaf de snelweg. De correlaties van de zomerdata op 90m worden weergegeven in figuren 4.14 en 4.15. Deze zijn berekend met een multiregressie analyse tool ontwikkeld door het RIVM (Beijk, 2009). De gebruikte regressie hier is OLSQ (Ordinary Least Squares). Hierin zijn de wegbijdrages voor NO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> uitgezet. Op 90m kan dus gezegd worden dat er sprake is van een afname in concentraties achter de vegetatie. De afname achter de vegetatie ten opzichte van de referentie op 90m is 26% voor NO<sub>2</sub> en 31% voor NO<sub>x</sub> met 95% betrouwbaarheidsintervallen van respectievelijk 7% en 5%. Tabel 4.1 laat zien hoe deze correlatie tussen referentielijn en vegetatielijn op de verschillende afstanden is en het verschil met wel en niet de regressielijn door het nulpunt te trekken. Het effect van vegetatie neemt toe met de afstand wat wil zeggen dat hier vooral een verdunningseffect optreedt door verandering van turbulentie- en stromingspatroon en niet zozeer door een vegetatie-effect, in dat geval zou het effect sterker zijn dicht bij de vegetatie en verderop afnemen. De offset van ongeveer 8-10 µg/m<sup>3</sup> gevonden in de regressies voor NO<sub>x</sub> en NO<sub>2</sub> geeft aan dat het initiële effect net achter de vegetatie een verhoging van de concentraties is. Pas bij afstanden vanaf 40 meter is het netto effect van de vegetatie op de concentratie van NO<sub>x</sub> positief. Voor NO<sub>2</sub> geldt dit pas voor afstanden vanaf ongeveer 90 meter.

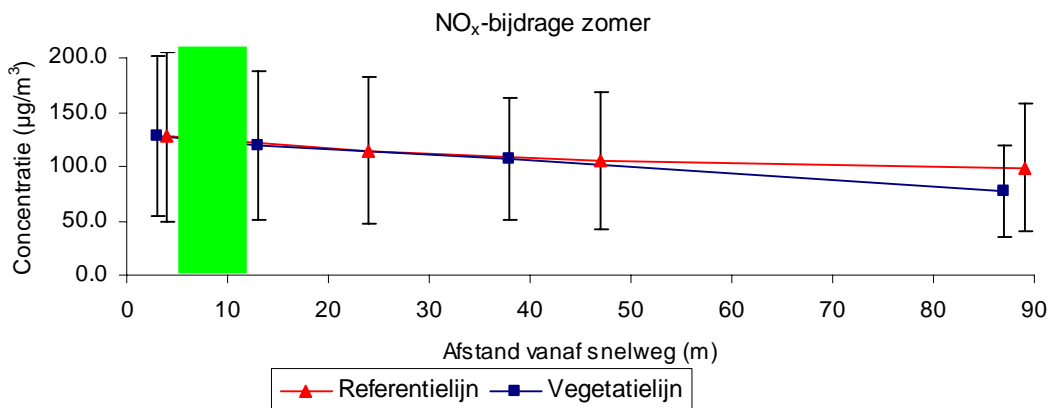
In de wintercampagne is het omgekeerde effect zichtbaar in concentraties en in bijdragen, dat wil zeggen dat er dan geen positieve bijdrage van de vegetatie is, maar een negatieve bijdrage tot zelfs 70% op 90m voor NO<sub>x</sub> en 38% voor NO<sub>2</sub> (zie Figuur 4.17 en Figuur 4.18). De concentratiegradiënten laten ook nog de standaarddeviatie in de metingen zien met een zeer grote spreiding voor NO<sub>x</sub>. Hieruit blijkt dan ook dat deze verschillen niet significant zijn. In de winter is het blad volledig verdwenen van de bomen, waardoor het geconstateerde turbulentie- en stromingseffect van de zomer niet meer waargenomen kan worden. Blijkbaar overheerst in de winter door het ontbrekende bladerdek het snelheidsverlagende en windafbuigende (concentratieverhogende) effect van de singel een sterkere rol dan de opgewekte extra turbulentie. Naast het turbulentie effect is er ook nog sprake van veel minder beschikbaar ozon.



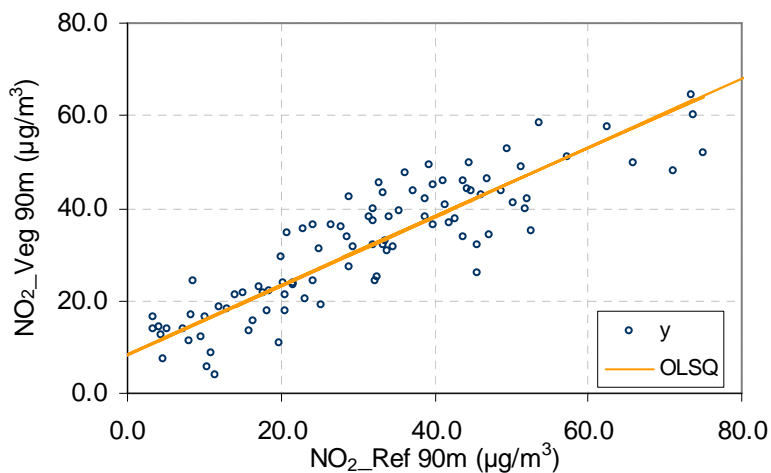
Figuur 4.11 Zomercampagne: Gradiënten van NO<sub>x</sub> -en NO<sub>2</sub> -concentraties ten opzichte van de afstand vanaf de weg. De errorbars geven de standaarddeviatie weer



Figuur 4.12 Zomercampagne: Gradiënten van de bijdrage aan de  $NO_2$ -concentraties ten opzichte van de afstand vanaf de weg bij de betreffende meetpunten. De foutenbalken geven de standaarddeviatie weer

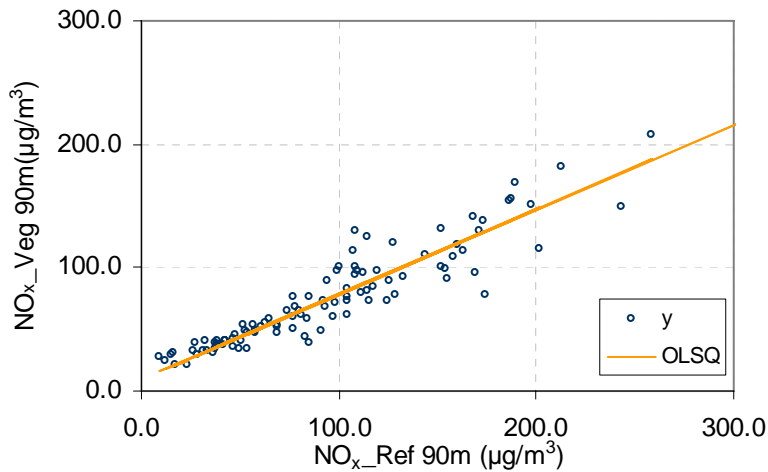


Figuur 4.13 Zomercampagne: Gradiënten van de bijdrage aan de  $NO_x$ -concentraties ten opzichte van de afstand vanaf de weg. De foutenbalken geven de standaarddeviatie weer



Figuur 4.14 Zomercampagne: Wegbijdrage van  $NO_2$ -concentraties in de zomer op 90m vanaf de weg:  $Y=0.74x+8.36$ ,  $R^2=0.79$  en 95%-betrouwbaarheidsinterval is 7%



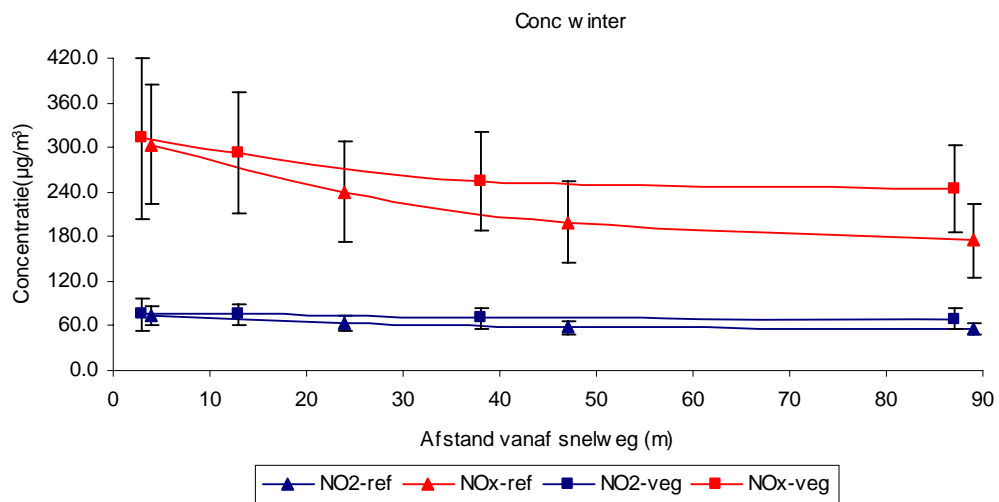


Figuur 4.15 Zomercampagne: Wegbijdrage van  $\text{NO}_x$ -concentraties in de zomer op 90m vanaf de weg:  $Y=0.69x+9.27$ ,  $R^2=0.87$  en 95%-betrouwbaarheidsinterval is 5%

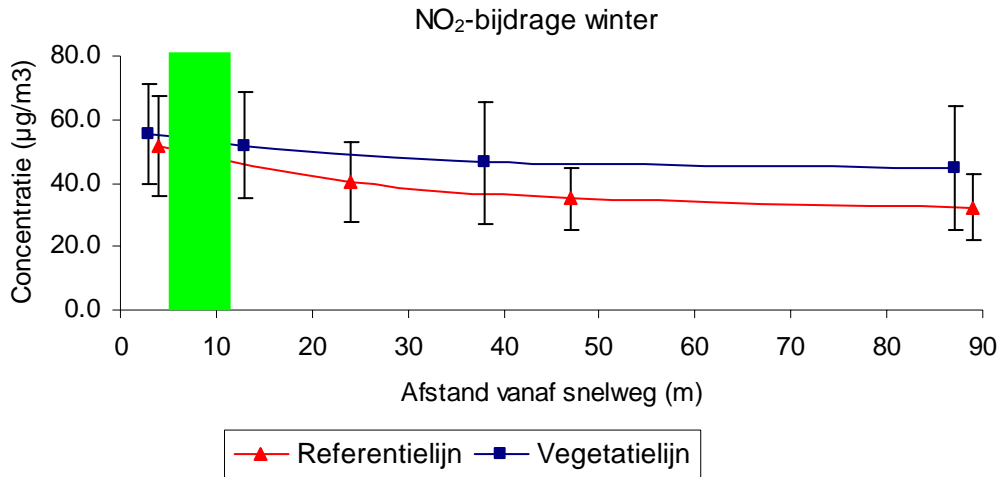
Tabel 4.1 Correlaties tussen referentie- en vegetatielijnen via OLSQ wel en niet door nulpunt. Daarbij staat ook de onzekerheid van de richtingscoëfficiënt aangegeven met U(RC)

Afstand van de weg (m)	$\text{NO}_2$ via OLSQ	U(RC)	$\text{NO}_x$ via OLSQ	U(RC)
3	$y=0.81x + 10.53$	0.04	$y=0.94x + 8.39$	0.04
15	$y=0.9x + 8.63$	0.04	$y=1.02x + 3.16$	0.04
40	$y=0.93x + 10.28$	0.04	$y=0.88x + 13.72$	0.04
90	$y=0.74x + 8.36$	0.04	$y=0.69x + 9.27$	0.03

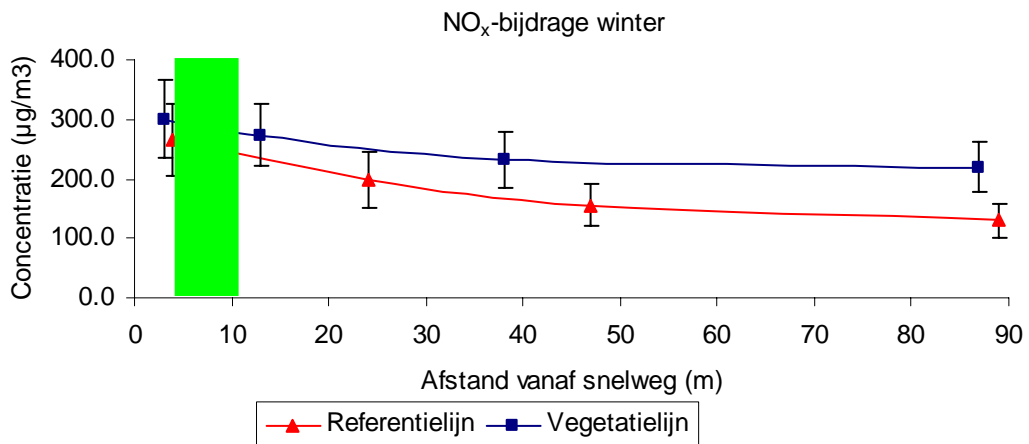
Afstand van de weg (m)	$\text{NO}_2$ via OLSQ(i(0))	U(RC)	$\text{NO}_x$ via OLSQ(i(0))	U(RC)
3	$y=1.04x$	0.02	$y=0.99x$	0.02
15	$y=1.1x$	0.03	$y=1.04x$	0.02
40	$y=1.21x$	0.03	$y=0.98x$	0.02
90	$y=0.95x$	0.02	$y=0.76x$	0.01



Figuur 4.16 Wintercampagne: Gradienten van  $\text{NO}_x$ - en  $\text{NO}_2$ -concentraties ten opzichte van de afstand vanaf de weg bij de betreffende meetpunten. De errorbars geven de standaarddeviatie weer



Figuur 4.17 Wintercampagne: Gradiënten van de bijdrage aan de NO<sub>2</sub>-concentraties ten opzichte van de afstand vanaf de weg bij de betreffende meetpunten. De errorbars geven de standaarddeviatie weer



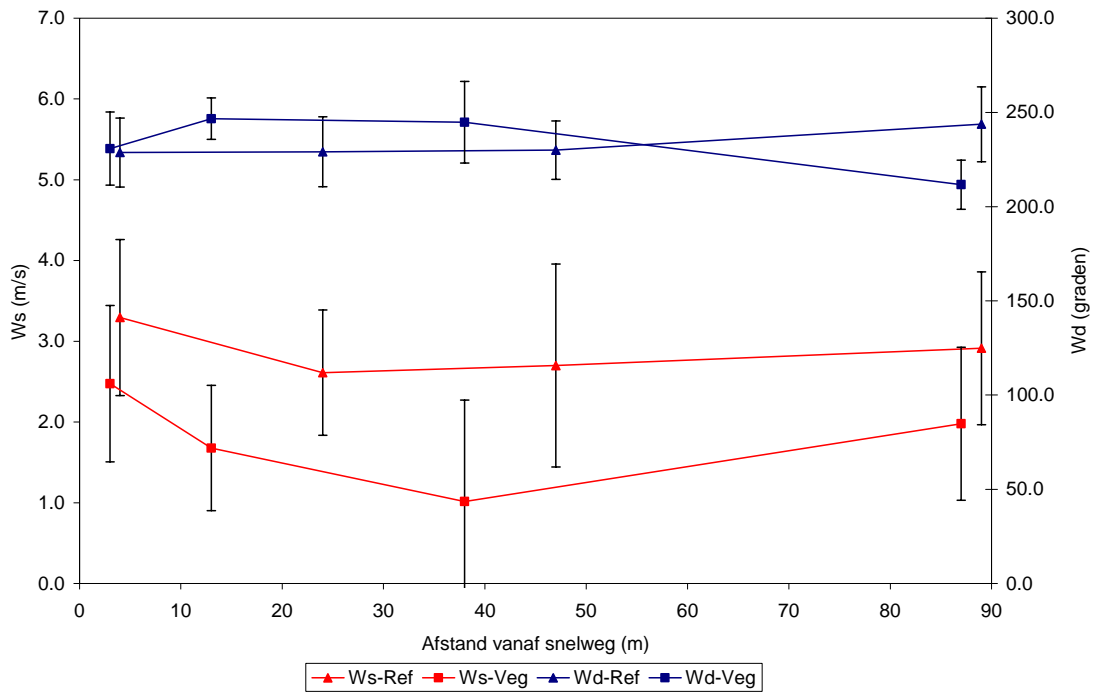
Figuur 4.18 Wintercampagne: Gradiënten van de bijdrage aan de NO<sub>x</sub>-concentraties ten opzichte van de afstand vanaf de weg bij de betreffende meetpunten. De errorbars geven de standaarddeviatie weer

De advectieterm is bepaald door de concentraties van de wegbijdragen van NO<sub>x</sub> te vermenigvuldigen met de windsnelheid loodrecht op de weg per locatie (zie vergelijking 1 en Figuur 4.20 en Figuur 4.21). Ter vergelijking is in Figuur 4.19 de gemeten windsnelheid en windrichting aangegeven inclusief de onzekerheid door middel van de standaarddeviatie, welke is aangegeven met foutenbalken in deze figuur.

$$W_{s_{\perp}} = \cos((270 - Wd) / 180) * \pi * W_s \quad (1)$$

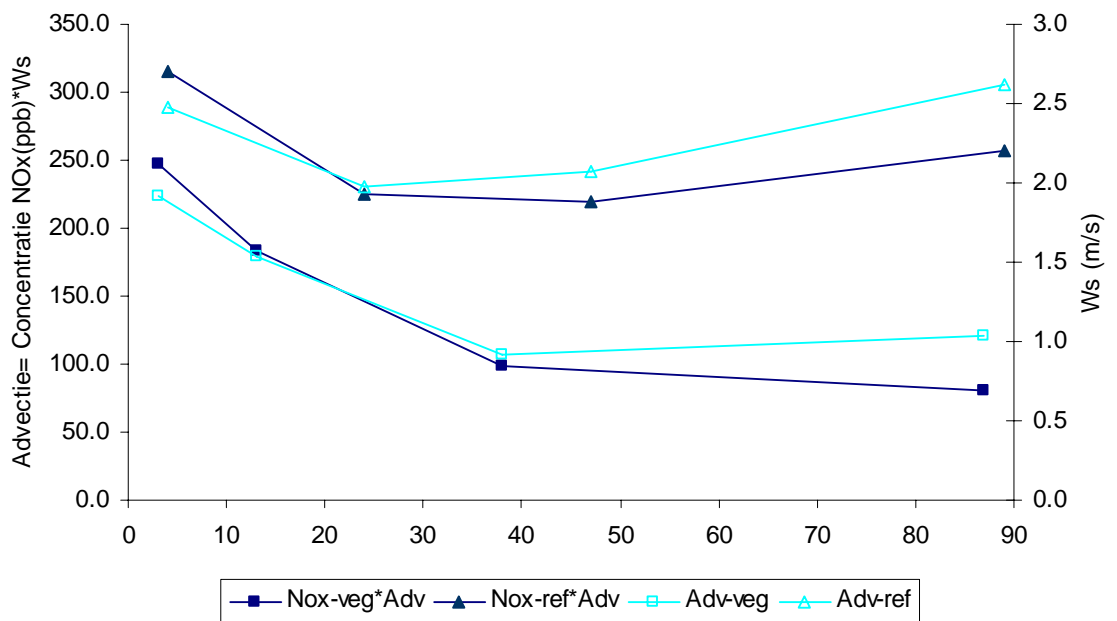
De windsnelheid is altijd lager op de gehele vegetatielijn, zowel in zomer als in de winter. De verschillen zijn alleen wel groter in de zomer in vergelijking met de winter. Op een afstand van 38m vanaf de weg is de laagste windsnelheid waargenomen op de vegetatielijn. De advectieterm laat voor de wintercampagne een omkeer in flux zien ongeveer op 45m. Tot 45m zijn in de vegetatielijn lagere concentraties gemeten, maar uiteindelijk is achter de vegetatie op 90m een verhoging van 42% in de advectieterm waar te nemen. In de zomersituatie lijkt over de volledige gradiënt een lagere advectie voor de vegetatielijn te zijn ten opzichte van de referentielijn. Dat betekent dus dat door de extra turbulentie veroorzaakt door de vegetatie de wegbijdrage in NO<sub>x</sub> verdeeld wordt over een grotere verticale kolom waardoor netto de absolute concentratie, ondanks de afnemende (gehalveerde) windsnelheid, niet sterk toeneemt ten opzichte van de referentie, maar zelfs iets afneemt op grotere afstanden. Dit geldt in mindere mate voor NO<sub>2</sub> op het 40 meter punt (zie de

bult in de blauwe lijn in Figuur 4.12), omdat de extra inmenging van ozon-rijke lucht uit hogere luchtlagen leidt tot meer omzetting van NO in NO<sub>2</sub> in de situatie met vegetatie.



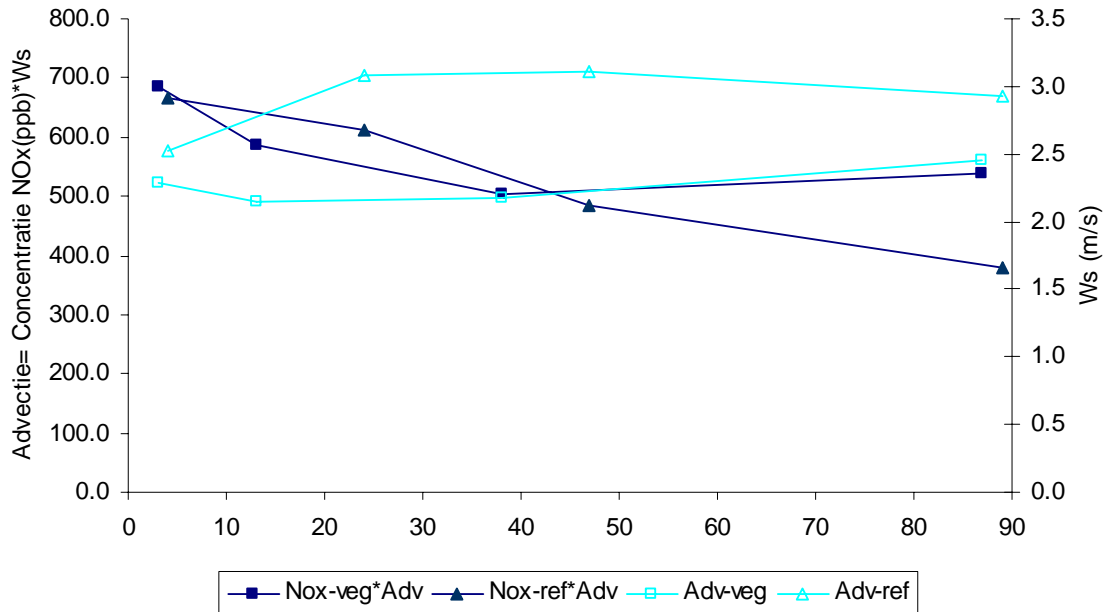
Figuur 4.19 Zomercampagne: gradiënten van windsnelheid (Ws op linker y-as) en windrichting (Wd op rechter y-as). Met de foutenbalken zijn de standaarddeviaties aangegeven

Zomer 2008



Figuur 4.20 Zomercampagne: gradiënten van NO<sub>x</sub>-concentraties vermenigvuldigd met de windsnelheid loodrecht op de weg. De afstanden zijn ten opzichte van de weg en de windsnelheden zijn waargenomen bij de betreffende meetpunten

Winter 2009



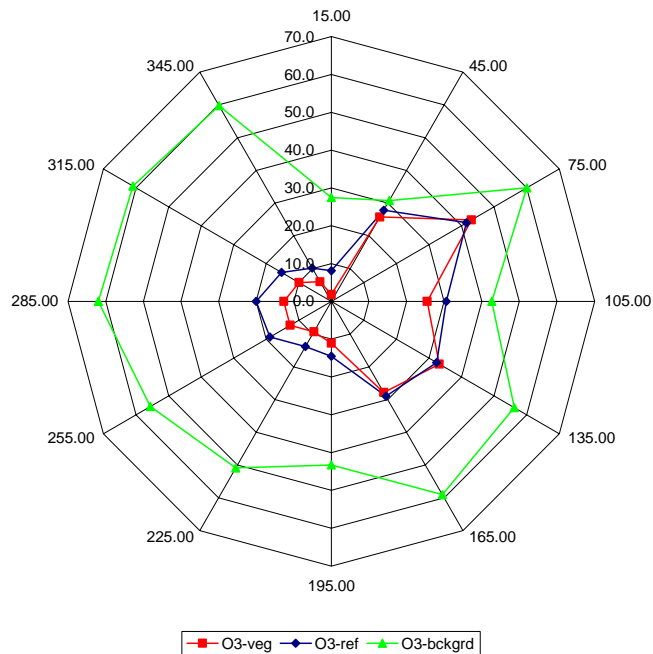
Figuur 4.21 Wintercampagne: gradiënten van  $\text{NO}_x$ -concentraties vermenigvuldigd met de windsnelheid loodrecht op de weg. De afstanden zijn ten opzichte van de weg en de windsnelheden zijn waargenomen bij de betreffende meetpunten

#### 4.2.3 Metingen $\text{O}_3$

Ozonconcentraties zijn gemeten op 1 punt in elke lijn en dan zo dicht mogelijk bij de monitor. In de vegetatielijin is dit op 13 m en in de referentielijn op 89m van de weg. Dit om te voorkomen dat NO en  $\text{O}_3$  in de leiding met elkaar reageren tot  $\text{NO}_2$ . In onderstaande figuur zijn de concentraties uitgezet voor de verschillende windrichtingen.

Op de achtergrondlocatie zijn de hoogste concentraties waargenomen. Hier is weinig  $\text{O}_3$  weggetitreerd door ontbreken van een grote bijdrage aan NO door bronnen als het wegverkeer. Op de locatie dicht bij de weg in de vegetatielijin is de  $\text{O}_3$ -concentratie het laagst bij westenwind. In de referentielijn wordt  $\text{O}_3$  op iets grotere afstand van de weg gemeten en is er al minder NO, veroorzaakt door het wegverkeer, aanwezig en zal er ook minder  $\text{O}_3$  weggetitreerd kunnen worden. Hierdoor is de  $\text{O}_3$ -concentratie iets hoger in vergelijking met de vegetatielijin. Bij oostenwind zijn de concentraties van de vegetatie- en referentielijn ongeveer gelijk.

In de wintercampagne zijn  $\text{O}_3$ -concentraties alleen op de achtergrondlocatie gemeten. Vergelijking van gemiddelde waarden in zomer en wintercampagne laten duidelijk lagere  $\text{O}_3$ -concentraties zien in de winter, namelijk  $24 \mu\text{g m}^{-3}$  ten opzichte van  $55 \mu\text{g m}^{-3}$  in de zomer.



Figuur 4.22 Windroos O<sub>3</sub>-concentraties (ppb) van vegetatielijn (op 13m), referentielijn (op 89m) en achtergrondlocatie

#### 4.2.4 Metingen fijn stof

Om de bijdrage van de weg te bepalen op de PM<sub>10</sub> concentratie is het ZW-W segment (210°-270°) nader bekeken. De uurdata in dit segment zijn gemiddeld voor de referentielijn (90m) en de achtergrondlocatie. Het verschil van deze twee gemiddelden geeft de mate waarin de weg bijdraagt aan de PM<sub>10</sub>-concentratie (gemeten met TEOMs) aan de oostelijke zijde van de snelweg (Tabel 4.1). De bijdrage van de A50 op de PM<sub>10</sub>-concentratie in dit windsegment was 1,7 µg/m<sup>3</sup>. De standaarddeviatie in deze periode is meer dan de helft van de gemiddelde concentratie. Dit geeft aan dat deze bijdrage niet significant is. De bijdrage van de A50 op de PM<sub>2.5</sub>-concentratie in windsegment van 225-315 was 0,7 µg/m<sup>3</sup> (ook Tabel 4.2). Deze PM<sub>2.5</sub>-concentraties zijn gemeten met een Osiris-instrument. Aangevoerd is dat de meetonzekerheid in PM<sub>2.5</sub> gemeten met de Osiris monitor 5,8% is (TNO, ongepubliceerde data). De bijdrage van de A50 is circa 9,6% van de gemeten PM<sub>2.5</sub>-concentraties op de verschillende locaties.

Tabel 4.3 laat de bijdragen met standaarddeviaties van PM<sub>10</sub> zien, dit is gemeten met TEOM en op de verschillende locaties zoals deze zijn aangegeven. De bijdragen konden bepaald worden doordat de gemiddelde concentraties verminderd zijn met de concentraties zoals die gemeten zijn op de achtergrondlocatie. Het wordt uit deze figuur duidelijk dat de standaarddeviaties altijd meer dan 100% van het gemiddelde zijn. De locaties waar de TEOM's hebben gestaan, zijn uiteindelijk niet ideaal geweest. Hierdoor is een vergelijking tussen referentie en vegetatie nu alleen op 90m uit te voeren en daarnaast nog tussen voor en achter de vegetatie. Deze data zegt weinig over verschillen tussen referentie en vegetatie dichtbij de snelweg. Dit is een keuze die is gemaakt op aantal en beschikbaarheid van TEOMs en bijbehorende kasten. Het probleem van TEOM metingen dichtbij een bron is de grote standaarddeviatie van de metingen, omdat de grotere deeltjes (opwaaiend stof, 1-10 µm) per deeltje grote invloed op de gemeten concentraties hebben, terwijl de directe emissie van verkeer uit zeer kleine deeltjes (grootte 20-50 nm) bestaat met per deeltje wel 20<sup>3</sup>-500<sup>3</sup>=8000 to 125 miljoen maal kleinere massa. Pas na middeling tot dag- of weekgemiddelden komt men tot waarnemingen met acceptabele standaardafwijkingen, zelfs bij grote totale deeltjes aantallen van 1 miljoen/m<sup>3</sup>.

Tabel 4.2 De bijdrage van de A50 op de gemeten PM<sub>10</sub> en PM<sub>2.5</sub> concentraties kan worden bepaald aan de hand van het verschil tussen de referentielijn op 90m en de achtergrondlocatie

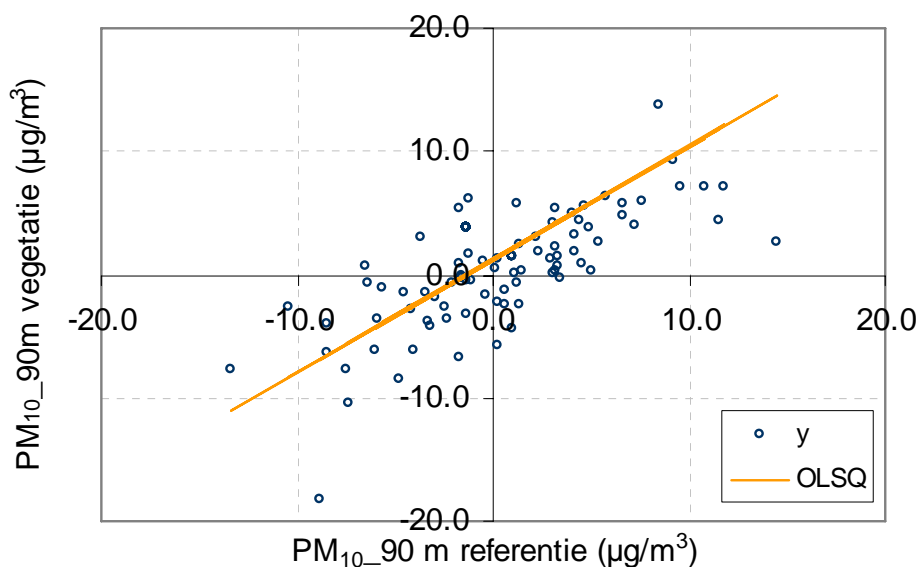
	Gemiddelde PM <sub>10</sub> -concentratie (µg/m <sup>3</sup> )	Standaard deviatie PM <sub>10</sub> -concentratie (µg/m <sup>3</sup> )	Gemiddelde PM <sub>2.5</sub> -concentratie (µg/m <sup>3</sup> )(Wd=225-315 <sup>0</sup> )
Achtergrond	20,0	11,9	7,2

Referentie	21,7	12,6	7,9
Bijdrage weg	1,7		0,7

Tabel 4.3 Gemiddelde PM<sub>10</sub>- wegbijdragen en standaarddeviaties voor de verschillende TEOM locaties

	Gemiddelde PM <sub>10</sub> -concentratie(µg/m <sup>3</sup> )	Standaarddeviatie PM <sub>10</sub> -concentratie (µg/m <sup>3</sup> )
Referentie (90m)	1,7	5,6
Vegetatie (3m)	6,5	7,5
Vegetatie (13m)	2,7	8,8
Vegetatie (90m)	2,6	5,8

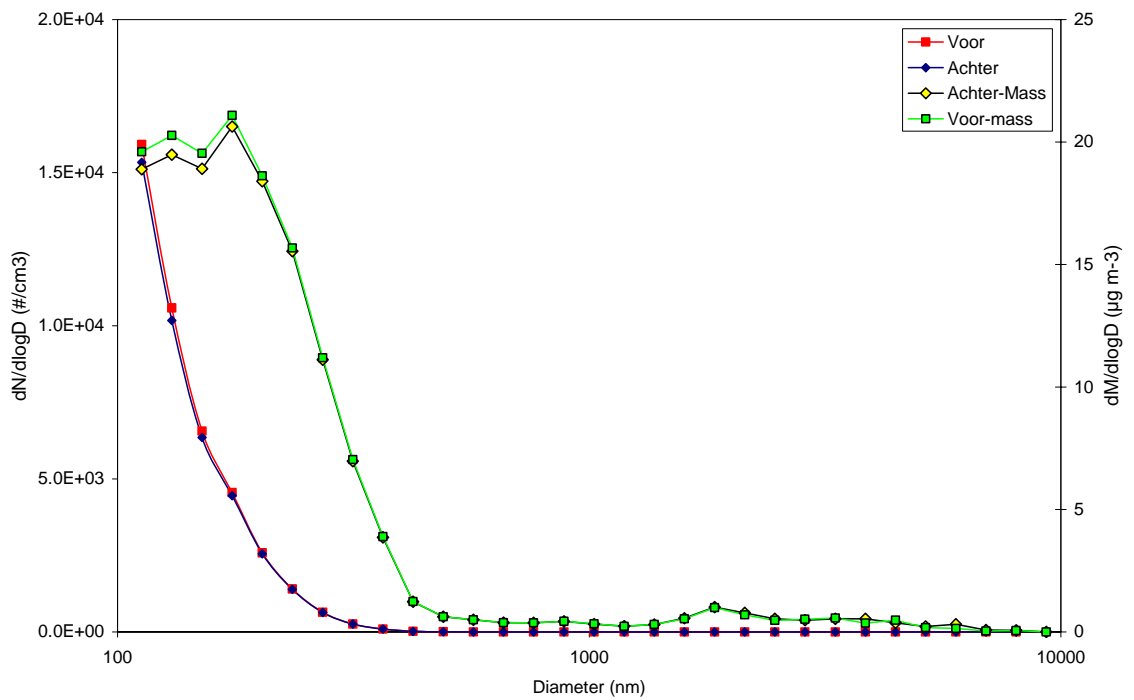
Correlaties tussen de vegetatie- en referentiezijde op 90m en voor en achter de vegetatie zijn uitgevoerd. Deze analyse is wederom met de regressie analyse tool van RIVM uitgevoerd. Correlatie op 90m is te zien in Figuur 4.23. De figuur van voor en achter de vegetatie was niet relevant met een correlatiecoëfficiënt van 0.24 en een 95%-betrouwbaarheidsinterval van 38%. De bijbehorende correlatiecoëfficiënten bij Figuur 4.23 is ook erg laag met 0.38. Het 95%-betrouwbaarheidsinterval van 14% laat ook nog eens zien dat de 8% vermindering van PM<sub>10</sub> op 90m achter de vegetatie niet significant aantoonbaar is. Hiermee kan dus geen duidelijke uitspraak gedaan worden over de trend in de lijn en eventuele afname in de concentraties van PM<sub>10</sub>.



Figuur 4.23 Bijdrage van de vegetatie op de PM<sub>10</sub>-concentratie gemeten met TEOMs via correlatie van de vegetatie en referentielocatie op 90m afstand van de weg.  $y=0.92x+1.26$ ,  $R^2$  is 0.38 en 95% betrouwbaarheidsinterval is 14%

Deeltjesaantallen en grootteverdeling zijn gemeten met de LASx en CPC. Figuur 4.24 laat de deeltjesgrootteverdeling zien op logaritmische schaal in aantallen en in massa zoals is gemeten met de LASx. Hieraan is te zien dat in de kleinste deeltjes een miniem verschil te zien is tussen deeltjes voor en na de vegetatie. Tabel 4.4 laat zien dat er een verschil is van ongeveer 2% in aantallen en in massa. De standaarddeviatie laat zien dat deze verschillen zeer onzeker zijn. PM<sub>10</sub> is niet opgenomen in de tabel omdat deze getallen niet juist worden beschouwd door een lange inlaatleiding die gebruikt moest worden naar voor de vegetatie. Wanneer de metingen van de CPC op aantallen worden vergeleken voor en achter de vegetatie is er een afname achter de vegetatie van 1%. Beide instrumenten laten een afname zien, maar zijn

beide niet significant, doordat de onzekerheid binnen deze meetmethoden groter zijn, wat de standaarddeviatie ook al aangeeft.



Figuur 4.24 Deeltjesgrootteverdeling op logaritmische schaal in aantallen(linkeras) en in massa(rechteras). Metingen zijn uitgevoerd tussen 18 en 21 juni 2008

Tabel 4.4 Gemiddelde concentraties voor en achter de vegetatie voor  $PM_{2.5}$  en  $PM_1$  gemeten met LASx. Hierbij staat tussenhaakjes de standaarddeviatie aangegeven. Daarnaast zijn in de laatste kolommen de aantallen gegeven gemeten met LASx en CPC

	$PM_{2.5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$PM_1$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Aantal LASx	Totaal aantal CPC
Achter vegetatie	10.9 (3.2)	10.7 (3.0)	$5,0 \cdot 10^3$	$4,6 \cdot 10^4$
Achter/voor	98%	98%	98%	99%
Voor vegetatie	11.1 (3.3)	10.9 (3.2)	$5,1 \cdot 10^3$	$4,7 \cdot 10^4$





## 5. Resultaten en discussie: Modelling

### 5.1 Inleiding

Het doel van de modellering is een precieze kwantificering van het vegetatie-effect. De modelberekeningen zijn uitgevoerd voor de periode 26 juni 2008 van 13 tot 16 uur. Voor deze periode zijn de modelresultaten vergeleken met metingen. Het betreft hier een eenvoudige vergelijking waarbij de gemeten concentraties op de meetpunten zijn vergeleken met de in het model berekende concentraties. In paragraaf 5.4 zijn de resultaten van een gevoeligheidsonderzoek gepresenteerd om inzicht te krijgen in de onzekerheid van de modelresultaten en de oorzaken van het vegetatie-effect.

### 5.2 Gemodelleerd vegetatie-effect

Figuren 5.1 en 5.2 laten de concentraties zien van de gemodelleerde stoffen. De ligging van de rijbanen is nog duidelijk te herkennen. De concentraties nemen af met toenemende afstand tot de weg. Ook is te zien dat de wind uit zuidwestelijke richting kwam. Aan de instulping en welving van de blauwe contouren is het effect van de vegetatie zichtbaar.

De concentraties op de CFD-monitorpunten langs de referentie- en de vegetatielijn zijn gegeven in Tabel 5.1. Op basis van deze concentraties is het vegetatie-effect bepaald. Het vegetatie-effect ( $E_{veg,x}$ ) is de reductie in de concentratiebijdrage van het verkeer op een bepaalde afstand tot de weg door de aanwezigheid van vegetatie:

$$E_{veg,x} = \left( \frac{C_{ref,x}}{C_{veg,x}} - 1 \right) \cdot 100\%$$

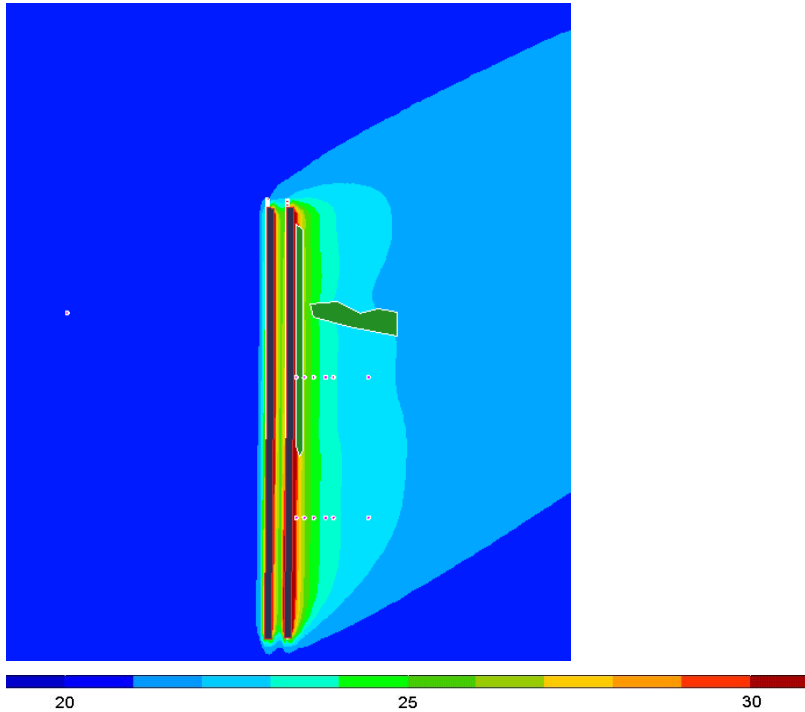
waarbij  $C_{ref,x}$  de concentratiebijdrage van het verkeer op afstand  $x$  tot de weg is, en  $C_{veg,x}$  de concentratiebijdrage van het verkeer op gelijke afstand tot de weg, maar dan achter de vegetatie. Het vegetatie-effect is weergegeven in de laatste kolommen van Tabel 5.1.

Tabel 5.1: Berekende concentraties ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en het vegetatie-effect (%) op verschillende afstanden tot de weg. Het vegetatie-effect is berekend als de reductie in de concentratiebijdrage van het verkeer door de aanwezigheid van vegetatie. Ook de achtergrondconcentraties staan vermeld.

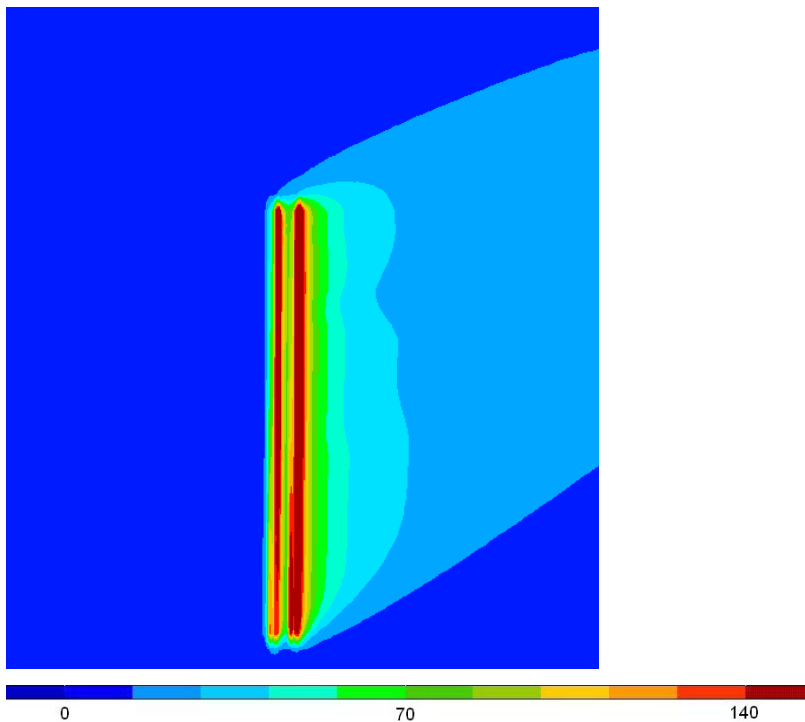
Afstand tot de weg (m)	Concentraties op vegetatielijn				Concentraties op referentielijn				Vegetatie-effect (%)			
	PM <sub>10</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
3	28.9	104.1	22.1	126.3	28.4	97.2	21.2	118.5	-7	-7	-7	-7
13	26.1	68.0	17.4	85.4	25.9	65.8	17.1	82.9	-3	-3	-3	-3
24	24.3	46.0	14.5	60.5	24.3	45.2	14.4	59.6	-2	-2	-2	-2
38	23.6	36.2	13.2	49.3	23.6	36.8	13.3	50.0	2	2	2	2
47	23.1	29.7	12.3	42.1	23.2	31.1	12.5	43.6	5	5	5	5
88	22.3	20.0	11.0	31.0	22.4	21.4	11.2	32.6	8	8	8	8
<i>achtergrond</i>	<i>20.8</i>	<i>1.1</i>	<i>8.6</i>	<i>9.7</i>	<i>20.8</i>	<i>1.1</i>	<i>8.6</i>	<i>9.7</i>				

Het valt op in Tabel 5.1 dat het vegetatie-effect op korte afstanden tot de weg negatief is. Dat wil zeggen dat op deze locaties de aanwezigheid van vegetatie tot een verhoging in de concentratiebijdrage van het verkeer leidt. Echter, op grotere afstand tot de vegetatie (> ~40 m), zorgt vegetatie wel voor een reductie in de concentratiebijdrage. Deze

reductie is zeer gering wanneer we kijken naar de absolute concentraties ( $< 1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  voor  $\text{NO}_x$  en  $< 0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  voor  $\text{PM}_{10}$ ). Opmerkelijk is dat het vegetatie-effect voor de verschillende stoffen gelijk is. Dit ondanks het grote verschil in de depositionsnelheid tussen de verschillende stoffen (paragraaf 3.3.2). Het verlies van stoffen door depositie (opname) op de vegetatie speelt blijkbaar in deze situatie een ondergeschikte rol. Het effect van de vegetatie op de stroming van de lucht is kennelijk belangrijker. Dit effect is voor alle onderzochte stoffen, die met de lucht worden meegevoerd, gelijk.



Figuur 5.1  $\text{PM}_{10}$  concentraties ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in het horizontale vlak op 1,8 m hoogte. De posities van de vegetatie, de snelweg en de meetpunten zijn ook weergegeven, zoals in Figuur 3.1

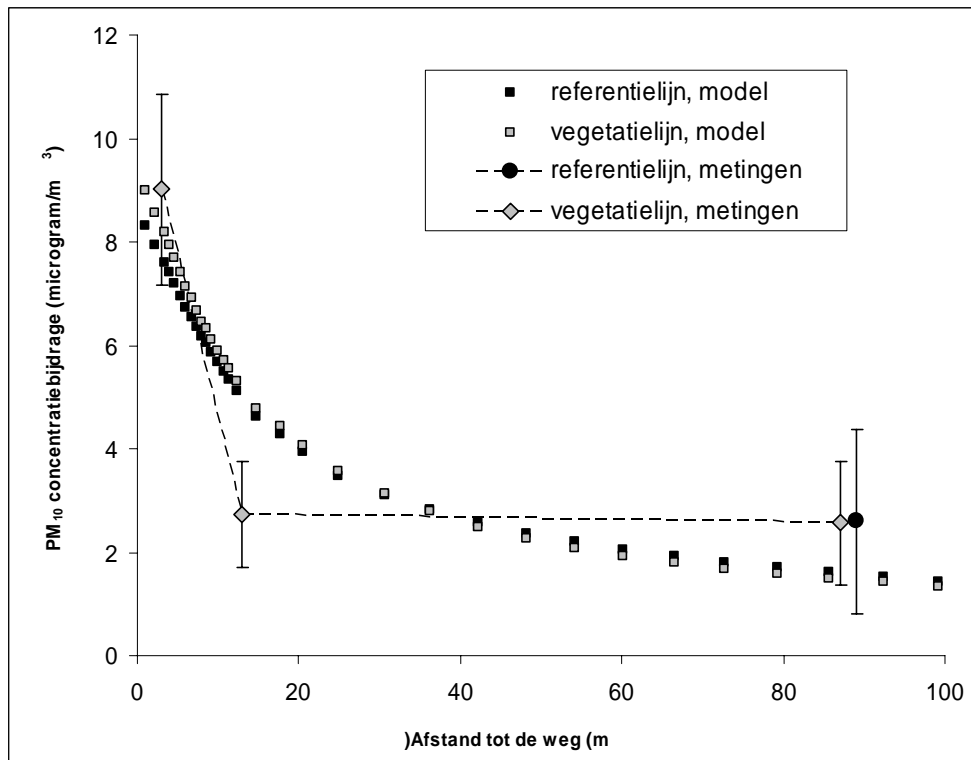


Figuur 5.2  $\text{NO}_x$  concentraties ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in het horizontale vlak op 1,8 m hoogte. Zie Figuur 5.1 voor de posities van de vegetatie, de snelweg en de meetpunten

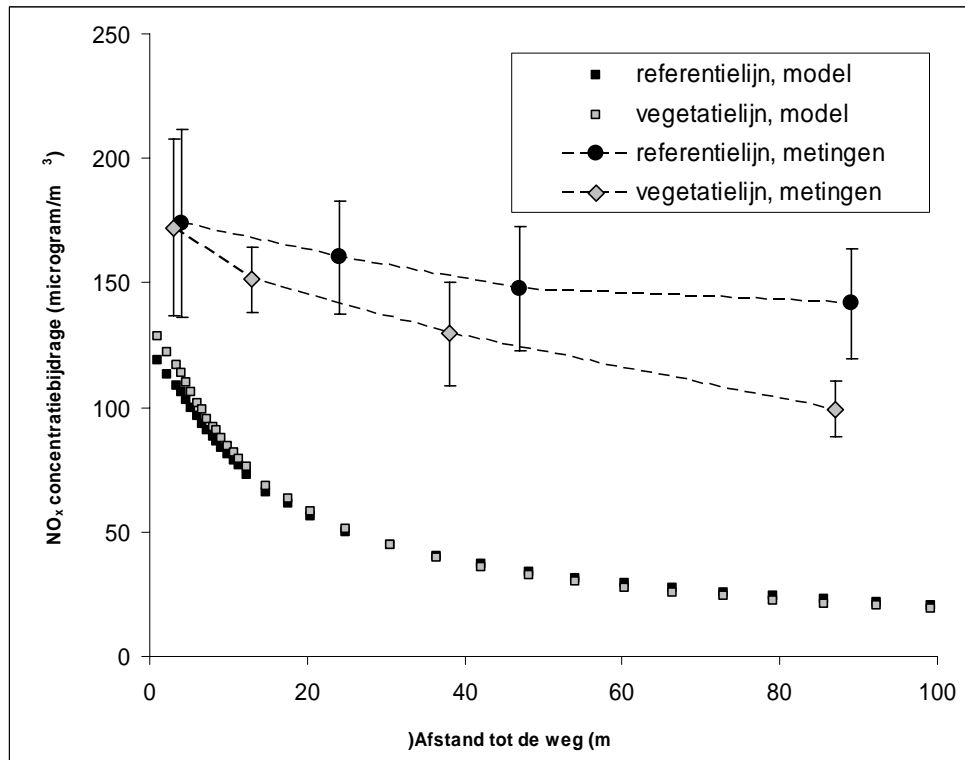
### 5.3 Vergelijking met metingen

Figuren 5.3 en 5.4 laten een vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde concentratiebijdrages zien voor verschillende afstanden tot de weg, voor zowel  $PM_{10}$  als  $NO_x$ . De waarden zijn gemiddelden voor de periode 26 juni 2008 van 13 tot 16 uur. De standaard deviatie in de metingen wordt ook getoond. Het is duidelijk dat voor  $NO_x$  een groter verschil tussen de referentie- en de vegetatielijnd wordt gemeten dan gemodelleerd. Voor  $PM_{10}$  is dit verschil niet duidelijk, omdat er maar één meetpunt is op de referentielijn, namelijk op 90 m afstand van de wegrand. De gemodelleerde concentratiebijdrages voor de vegetatielijnd en de referentielijnd liggen min of meer op elkaar. Voor  $PM_{10}$  liggen de modelresultaten binnen de spreiding in de metingen, met uitzondering van die op 13 meter afstand van de wegrand. Dat hangt ook samen met de grote spreiding in de meetresultaten van  $PM_{10}$ . Voor  $NO_x$  zijn de verschillen tussen metingen en modelresultaten groter. Het model berekent lagere concentraties en een snellere afname nabij de weg dan uit de metingen blijkt.

Voor de verschillen tussen metingen en modelresultaten kunnen diverse oorzaken worden genoemd. Het kan te maken hebben met onzekerheden in de invoer van de CFD-berekeningen, zoals de emissiesterkte van het verkeer. Maar het kan ook te maken hebben met onzekerheid in de dispersieberekeningen of de gemodelleerde verkeersgeïnduceerde turbulentie. Daarnaast zijn er de onzekerheden in de metingen die de verschillen kunnen verklaren.

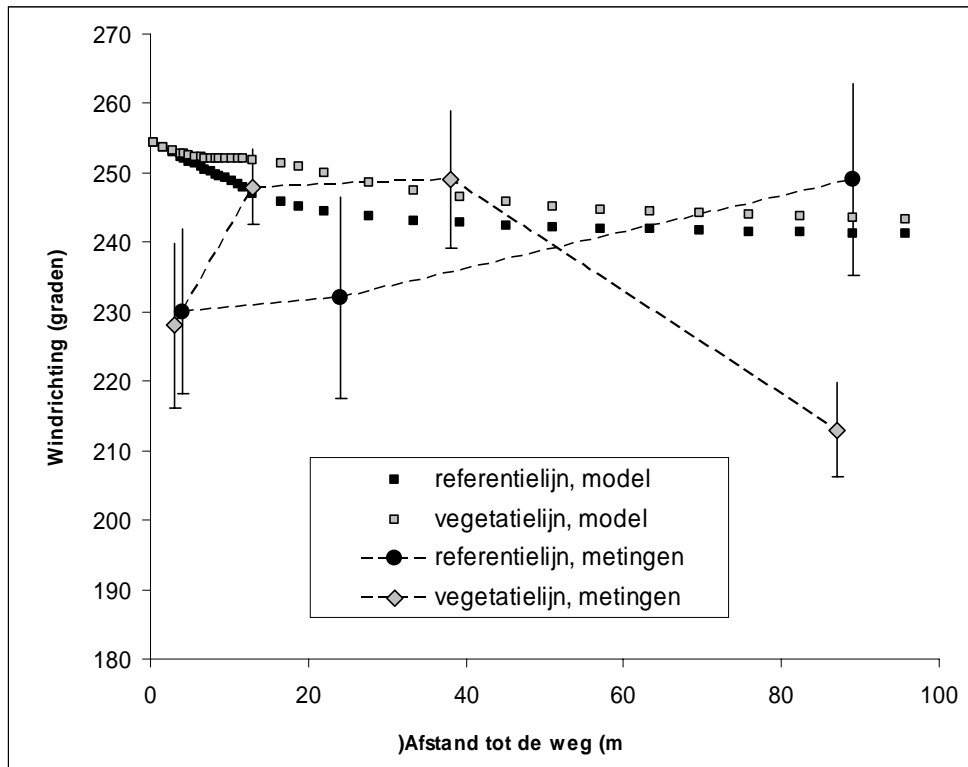


Figuur 5.3 Gemeten en gemodelleerde  $PM_{10}$  concentratiebijdrages van het verkeer op 1,5 m hoogte voor verschillende afstanden tot de weg (gemiddelde voor de periode 26 juni 2008, 13 tot 16 uur). De foutenvlag geeft de standaard deviatie in de metingen weer

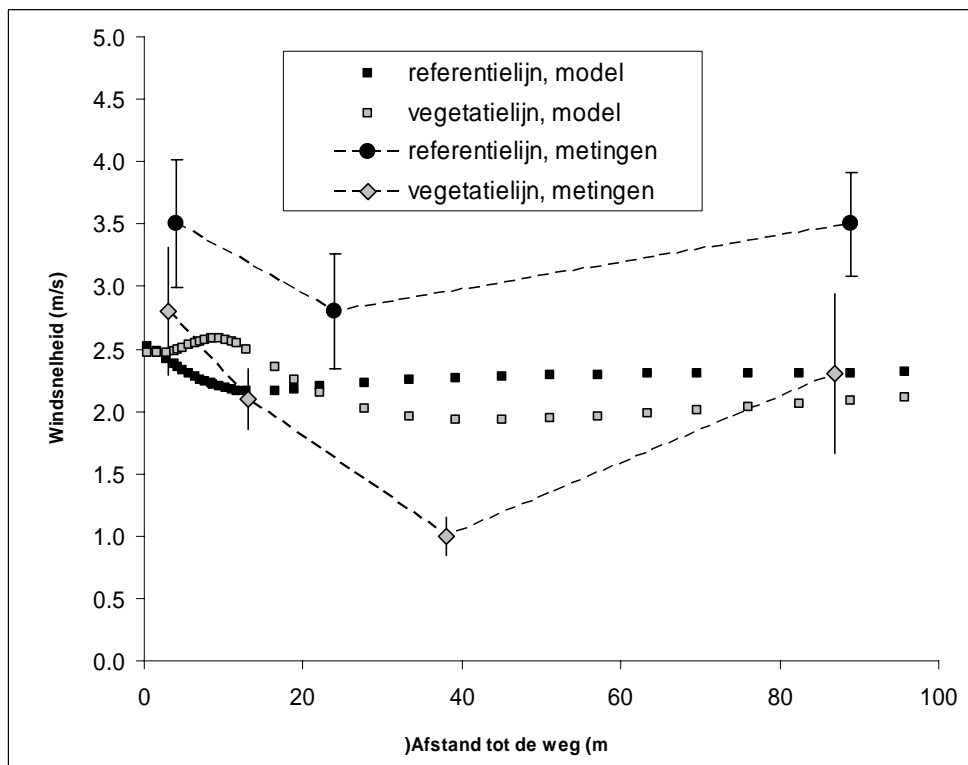


Figuur 5.4 Gemeten en gemodelleerde  $NO_x$  concentratiebijdrages van het verkeer op 1,5 m hoogte voor verschillende afstanden tot de weg (gemiddelde voor de periode 26 juni 2008, 13 tot 16 uur). De foutenvlag geeft de standaard deviatie in de metingen weer

Figuren 5.5 en 5.6 laten een vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde windrichting en windsnelheid zien voor verschillende afstanden tot de weg. Gemodelleerde en gemeten windrichtingen zijn beide uit west tot zuidwestelijke richting en worden beide westelijker achter de vegetatie. De gemeten verschillen in de windrichting tussen de vegetatielijn en de referentielijn, en de gemeten verandering in de windrichting met toenemende afstand tot de weg zijn echter groter dan de modelberekeningen laten zien. Dit geldt ook voor windsnelheid (Figuur 5.6); de gemeten windsnelheid achter de vegetatie is aanzienlijk lager dan op de referentielijn, terwijl dit in de modelberekeningen niet zo is. Tevens valt voor windsnelheid op dat de gemodelleerde windsnelheid in de vegetatie hoger is dan bij de referentielijn. Dit heeft te maken met het LAD-profiel (Tabel 3.1) op grond waarvan de modelberekeningen zijn uitgevoerd. Doordat onderin de vegetatie de bladdichtheid lager is dan hoger in de vegetatiestrook ontstaat er in de modelsimulaties een tunneleffect. De wind vliegt als het ware onder de vegetatie door. Aanvullende modelberekeningen lieten zien dat wanneer de vegetatiedichtheid homogeen over de hoogte zou zijn, dit tunneleffect verdwijnt. Tevens toonden deze berekeningen aan dat dit een niet noemenswaardig effect op de gemodelleerde concentraties heeft.



Figuur 5.5 Gemeten en gemodelleerde windrichting op 2 m hoogte voor verschillende afstanden tot de weg (gemiddelde voor de periode 26 juni 2008, 13 tot 16 uur). De foutenvlag geeft de standaard deviatie in de metingen weer



Figuur 5.6 Gemeten en gemodelleerde windsnelheid op 2 m hoogte voor verschillende afstanden tot de weg (gemiddelde voor de periode 26 juni 2008, 13 tot 16 uur). De foutenvlag geeft de standaard deviatie in de metingen weer

## 5.4 Gevoeligheidsonderzoek

Er zijn verschillende gevoeligheidstests uitgevoerd met als doel de onzekerheid in de modelresultaten te bestuderen en de oorzaken van het vegetatie-effect te kwantificeren. Hierbij is gekeken naar veranderingen in het vegetatie-effect als gevolg van afwijkingen ten opzichte van de situatie 26 juni 2008, 13 tot 16 uur (de standaardsituatie). De resultaten voor PM<sub>10</sub> en NO<sub>x</sub> zijn gepresenteerd in de Tabellen 5.2 en 5.3. Tabel 5.2 geeft het gemodelleerde vegetatie-effect (%) voor PM<sub>10</sub> en NO<sub>x</sub> op verschillende afstanden tot de weg voor de verschillende gevoeligheidsruns, terwijl Tabel 5.3 het absolute concentratieverschil tussen de vegetatielijijn en de referentielijn voor de verschillende afstanden tot de weg weergeeft. Het gevoeligheidsonderzoek heeft zich op de volgende aspecten gericht:

- **Windrichting:** Uit Tabel 5.2 en 5.3 blijkt dat het vegetatie-effect nauwelijks verandert bij een veranderende windrichting over 30° en de concentratieverschillen tussen vegetatie- en referentielijn hierdoor kleiner worden. In de standaardsituatie was de windrichting zuidwest. Wanneer de wind vanuit het westen komt, blijft het vegetatie-effect dus redelijk ongewijzigd.
- **Windsnelheid:** Ook wanneer de windsnelheid in de modelberekeningen verdubbelt ten opzichte van de standaardsituatie heeft dit nauwelijks invloed op het vegetatie-effect. Dit ligt in de lijn van de verwachtingen aangezien concentraties schalen met de windsnelheid. Dit is ook af te leiden uit Tabel 5.3, waaruit blijkt dat de concentratieverschillen tussen vegetatie- en referentielijn zijn gehalveerd bij een verhoging van de windsnelheid ten opzichte van de standaardsituatie.
- **Oppervlakteruwheid:** Wanneer voor de oppervlakteruwheid een hogere waarde wordt genomen ( $z_0 = 10$  cm i.p.v. 3 cm), verandert het windprofiel en vindt er meer afremming nabij het aardoppervlak plaats. De verandering in het vegetatie-effect is gering.
- **Geen depositie (depositiesnelheid = 0):** Om het effect van depositie in het vegetatie-effect van de standaardsituatie te bepalen ten opzichte van het effect door een veranderd windveld, is er ook een simulatie uitgevoerd waarbij de depositiesnelheden van NO<sub>2</sub> en PM<sub>10</sub> op nul zijn gezet. Het vegetatie-effect dat in deze simulatie gevonden wordt, kan dan alleen aan de verandering in het windveld worden toegeschreven. Uit dit experiment blijkt dat bij een depositiesnelheid van nul het vegetatie-effect en de concentratieverschillen tussen vegetatie- en referentielijn gelijk zijn aan die van de standaardsituatie. Hieruit is te concluderen dat depositie een kleine rol heeft in de standaardsituatie. Het effect van vegetatie op de concentraties wordt dus voornamelijk veroorzaakt door een verandering in het windveld. NB: Dat depositie geen rol speelt in het vegetatie-effect blijkt ook uit de berekende vegetatie-effecten. Die zijn voor NO<sub>x</sub> en PM<sub>10</sub> gelijk, terwijl de depositiesnelheid van beide stoffen verschillend is.
- **Dichte vegetatie:** Er is ook een modelrun uitgevoerd waarbij de LAD is verhoogd naar 1 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> en de breedte van de vegetatie over de gehele hoogte op 8 m is gezet. Op deze manier is het effect van een dichtere en bredere vegetatie op de concentraties gesimuleerd. De resultaten laten zien dat hierdoor het vegetatie-effect wordt versterkt: de concentratiebijdrages vlak achter de vegetatie nemen toe en op grotere afstand tot de weg leidt dit tot een grotere reductie in de concentraties. Echter, het totale vegetatie-effect blijft gering.
- **Wintersituatie (verlaging van de LAD):** Tijdens de wintercampagne is de vegetatie opnieuw gekarakteriseerd. De LAD is in de winter lager dan in de zomer. In dit gevoeligheidsonderzoek hebben we het effect hiervan doorgerekend. Het LAD profiel dat we hiervoor hebben gebruikt staat in Tabel 3.1 vermeld. Tabel 5.2 laat zien dat de concentraties op grotere afstand van de weg minder gereduceerd worden in de winter.

Tabel 5.1 *Het gemodelleerde vegetatie-effect (%) voor PM<sub>10</sub> en NO<sub>x</sub> op verschillende afstanden tot de weg voor verschillende gevoeligheidsruns. Het vegetatie-effect is de procentuele reductie in de concentratiebijdrage van het verkeer door de aanwezigheid van vegetatie*

Afstand tot de weg (m)	Standaard situatie*: 26 juni 2008 13-16 uur		Windrichting is 270°		Windsnelheid verdubbeld		z <sub>0</sub> = 10 cm		Depositie-snelheid = 0		Dichte vegetatie		Winter-vegetatie	
	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>
3	-7	-7	-7	-7	-6	-6	-5	-5	-7	-7	-11	-11	-7	-7
13	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-3	-3	-12	-12	-3	-3
24	-2	-2	-1	-1	-1	-1	1	1	-2	-2	-6	-6	1	1
38	2	2	1	1	2	2	4	4	2	2	2	2	3	3
47	5	5	4	4	5	5	7	7	5	5	8	8	3	3
88	8	8	6	6	7	7	7	7	8	8	14	14	3	3

Tabel 5.2 *Het gemodelleerde concentratieverschil (µg/m<sup>3</sup>) tussen de vegetatielijin en de referentielijn voor PM<sub>10</sub> en NO<sub>x</sub> op verschillende afstanden tot de weg voor de verschillende gevoeligheidsruns*

Afstand tot de weg (m)	Standaard situatie*: 26 juni 2008 13-16 uur		Windrichting is 270°		Windsnelheid verdubbeld		z <sub>0</sub> = 10 cm		Depositie-snelheid = 0		Dichte vegetatie		Winter-vegetatie	
	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>
3	0.5	7.8	0.5	7.6	0.2	3.3	0.3	4.2	0.5	7.8	0.9	13.0	0.6	8.1
13	0.2	2.5	0.1	1.9	0.1	1.0	0.1	0.9	0.2	2.5	0.7	9.9	0.2	2.6
24	0.1	0.9	0.0	0.6	0.0	0.3	0.0	-0.2	0.1	0.9	0.2	3.1	0.0	-0.4
38	0.0	-0.7	0.0	-0.6	0.0	-0.4	-0.1	-1.0	0.0	-0.7	-0.1	-1.0	-0.1	-1.0
47	-0.1	-1.6	-0.1	-1.2	-0.1	-0.7	-0.1	-1.3	-0.1	-1.6	-0.2	-2.5	-0.1	-1.1
88	-0.1	-1.6	-0.1	-1.4	0.0	-0.7	-0.1	-0.9	-0.1	-1.6	-0.2	-2.7	0.0	-0.6

\*In de standaard situatie is de windrichting 240°, de windsnelheid 3,5 m/s en z<sub>0</sub> = 3 cm. Het LAD profiel van de standaard situatie staat beschreven in Tabel 5.2.





## 6. Conclusies

### 6.1 Effectiviteit van vegetatie op vermindering concentraties

Na een (relatief onzekere) correctie voor systematische verschillen tussen de gebruikte gasmonitoren blijkt dat de  $\text{NO}_x$ -concentraties direct achter de vegetatie iets hoger zijn dan de  $\text{NO}_x$ -concentraties aan de referentiezijde, dit ondanks de sterk afgenomen windsnelheden direct achter de vegetatie in de zomerse situatie.  $\text{NO}_x$ -concentraties nemen sterker af aan de vegetatiezijde met afstand tot de weg.  $\text{NO}_2$ -concentraties zijn in de toestand met vegetatie relatief verhoogd op de eerste 40 meter na de vegetatie door verhoogde omzettingen van  $\text{NO}$  met extra ingemengde Ozon. De effecten van extra turbulentie en verandering van stroming bepalen grotendeels de verschillen tussen referentie- en vegetatielijn. Er zijn geen aanwijzingen gevonden voor een opname van  $\text{NO}_x$  door de vegetatie, de meetonzekerheden bleken helaas ook te groot om de vermoedelijke effecten van opname van  $\text{NO}_x$  te kunnen vaststellen.

Conclusies voor wat betreft  $\text{PM}_{10}$  en  $\text{PM}_{2.5}$ -metingen:

- De A50 levert niet een duidelijk meetbare bijdrage aan de fijn stof concentratie in de omgeving van de snelweg. Voor grotere deeltjes,  $\text{PM}_{10}$ , levert de snelweg een niet significant aantoonbare bijdrage aan de gemeten fijn stof concentraties in de omgeving van de snelweg. Voor kleinere deeltjes,  $\text{PM}_{2.5}$ , kan de bijdrage van de snelweg niet met volle zekerheid worden vastgesteld.
- De invloed van vegetatie op 90m naast een snelweg (A50) op de concentratie fijn stof ( $\text{PM}_{10}$  en  $\text{PM}_{2.5}$ ) is niet aantoonbaar. Dit blijkt uit het feit dat het aanwezig zijn van vegetatie langs de snelweg niet leidt tot aantoonbare lagere  $\text{PM}_{10}$  en  $\text{PM}_{2.5}$  concentraties op een afstand van 90 meter vanaf de snelweg, vergeleken met een gelijke situatie waarin er geen vegetatie aanwezig is tussen de meetlocatie en dezelfde snelweg. Daar de invloed van de weg op de fijn stof concentratie al niet kan worden vastgesteld, is het ook te verwachten dat de invloed van de vegetatie ook niet kan worden aangetoond. Daarnaast is ook geen significant verschil te vinden in concentraties tussen voor en achter de vegetatie. Vanwege praktische redenen is voor deze opstelling gekozen. Hiermee valt niets te zeggen over een verschil in  $\text{PM}_{10}$  op bijvoorbeeld 25m van de weg. Het is mogelijk dat op een kortere afstand van de weg wel een effect optreedt.

Conclusies voor wat betreft deeltjesgrootteverdelingen en -aantallen:

- De metingen tonen aan dat dicht bij de weg het wegverkeer een significante bijdrage levert aan de toename van het aantal deeltjes kleiner dan  $1 \mu\text{m}$ . Er kan op grond van onze resultaten niet worden aangetoond dat bepaalde deeltjesgroottes wel worden afgevangen. Beide instrumenten laten een afname zien van respectievelijk 1 en 2%, maar beide verschillen zijn niet significant. Uitgedrukt in massa is deze reductie in fijn stof concentratie nihil.

### 6.2 Invloed van vegetatie op de verspreiding

Windsnelheid heeft een duidelijk ander patroon in de vegetatielijn in vergelijking met de referentielijn. De referentielijn laat op alle afstanden van de weg een hogere gemiddelde windsnelheid zien, dit effect is het sterkts in de zomer. In de advectieterm voor  $\text{NO}_x$  op de beoordelingshoogte van 1.5 meter is duidelijk uit de metingen af te leiden dat in de zomer de extra turbulentie door de vegetatie leidt tot een sterkere verticale menging en lagere advectiefluxen voor  $\text{NO}_x$ , in de winter geldt dit in sterk mindere mate en maar tot op ongeveer 45 meter, op grotere afstanden lijkt de vegetatie zelfs tot iets grotere advectie op waarnemingshoogte te leiden.

### 6.3 Modellerings

Op grond van de CFD-berekeningen is het volgende te concluderen:

- Het effect van de vegetatiestrook op de concentratiebijdrages van het verkeer langs de snelweg is gering. Op korte afstand tot de weg ( $< 40 \text{ m}$ ) leidt de aanwezigheid van vegetatie tot een kleine verhoging van de concentratiebijdrages van ongeveer 7%. Op afstanden groter dan 40 m is een kleine reductie in de concentratiebijdrage van ongeveer 8% gemodelleerd. Dit komt overeen met een zeer geringe verandering in de concentratie:  $< 1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  voor  $\text{NO}_x$  en  $< 0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  voor  $\text{PM}_{10}$ . Deze getallen zijn representatief voor de specifieke vegetatiestrook nabij Vaassen en gelden voor een zomersituatie onder atmosferisch neutrale condities.

- Het effect van de vegetatie op de concentraties wordt grotendeels veroorzaakt doordat de vegetatie het windveld beïnvloedt. Depositie in de vegetatie is gering en de filterende werking van vegetatie is dus niet aangetoond.
- Een gevoeligheidsonderzoek liet zien dat bovenstaande conclusies niet wijzigen wanneer de windrichting, de windsnelheid, of de ruwheid van het terrein verandert. Een dikkere vegetatiestrook waarvan de LAD minstens twee keer zo hoog is zorgt voor een sterkere reductie in de concentraties op afstanden groter dan 40 m tot de weg, maar het totale vegetatie-effect blijft gering.

Doordat de chemie in de modelberekeningen niet was meegenomen, kon het effect van inmening van ozon uit hogere luchtlagen op de NO<sub>2</sub> concentraties nabij de vegetatie niet worden bepaald. We verwachten dat dit proces tot een verhoging van de NO<sub>2</sub> concentraties achter de vegetatie zal leiden.

# Literatuur

Beijk, R., 2009. Multiregressietool analyse software. RIVM.

Breuer L., K. Eckhardt & H.G. Frede, 2003. Plant parameter values for models in temperate climates. *Ecological Modelling* 169, 237-293.

Genuchten M.T. van, 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 892-898.

Goudriaan J. and H.H. van Laar, 1994. *Modelling Potential Crop Growth Processes*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 238 p

Goudriaan, J. 1977. *Crop Micrometeorology: a Simulation Study*. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, 249 p

Kuipers, S.F. 1976. *Bodemkunde*. Tjeenk-Willink, Culemborg, pagina 92.

Löffler, A.E., A.M. Gordon, T.J. Gillespie, 1992. Optical porosity and windspeed reduction by coniferous windbreaks in South Ontario. *Agroforestry Systems* 17, 119-133

Okano K., T. Machida & T. Totsuka, 1988. Absorption of atmospheric nitrogen dioxide by several herbaceous species estimation by the nitrogen-15 dilution method. *New Phytologist* 109, 203-210.

Pilegaard, K.; Skiba, U.; Ambus, P.; Beier, C.; Bruggemann, N.; Butterbach-Bahl, K.; Dick, J.; Dorsey, J.; Duyzer, J.; Gallagher, M.; Gasche, R.; Horvath, L.; Kitzler, B.; Leip, A.; Pihlatie, M. K.; Rosenkranz, P.; Seufert, G.; Vesala, T.; Westrate, H.; Zechmeister-Boltenstern, S.. 2006 Factors controlling regional differences in forest soil emission of nitrogen oxides (NO and N<sub>2</sub>O). *Biogeosciences*, 3, 651-661.

Raupach M.R., N. Woods, G. Dorr, J.F. Leys & H.A. Cleugh, 2001. The entrapment of particles by windbreaks. *Atmospheric Environment* 35, 3373-3383.

Tonneijck A.E.G. & M. Blom-Zandstra, 2002. *Landschapselementen ter verbetering van de luchtkwaliteit rond de Ruit van Rotterdam: een haalbaarheidsstudie*. Plant Research International, Wageningen. 26 p.

Weijers, E.P., Kos, G.P.A., Bulk, W.C.M. van den & Vermeulen, A.T, 2007. *Onderzoek naar de luchtkwaliteit rondom een vegetatiestrook langs de snelweg*. Petten, ECN, rapport ECN-E--07-011.

Wesseling J.P., J. Duyzer, A.E.G. Tonneijck & C.J. Van Dijk, 2004. *Effecten van groenelementen op NO<sub>2</sub> en PM<sub>10</sub> concentraties in de buitenlucht*, TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie, Apeldoorn, 43 pp.

Wesseling, J., Beijk, R., Kuijeren, N. van, 2008. *Effecten van groen op luchtkwaliteit*. Status 2008. RIVM rapport, 680705012/2008.

Woesten J.H.M., G.J. Veerman, D.G.W.J. M. & J. Stolte, 2001. *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks*. Vernieuwde uitgave 2001. 0928-0944, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 86 pp.



# Bijlage A Resultaten van de vegetatieopname op 28 mei 2008

object	berm	singel		slootalud
bedekking (%)		k-laag	s-laag	b-laag
kruidlaag	92	30		98
struiklaag			90	
boomlaag				98
grashoogte (cm)	30/60	30	300	1500
opnameoppervlakte (m)	5 x 20	6 x 20		6 x 20
grassen		grassen		
Gewoon struisgras	2a	2m		Agrostis capillaris
Fioringras	2a			Agrostis stolonifera
Grote vossesstaart	2m	1		1 Alopecurus pratensis
Glanshaver	2b	2m		2b Arrhenatherum elatius
Zachte dravik	2m			1 Bromus hordeaceus
Kropaar	2a	2m		2m Dactylis glomerata
Kweek	2m			1 Elytrigia repens
Rietzwenkgras	+			Festuca arundinacea
Beemdlangbloem	r			Festuca pratensis
Rood zwenkgras	2b			1 Festuca rubra
Gestreepte witbol	3	2b		5 Holcus lanatus
Gladde witbol	+	2m		2m Holcus mollis
Engels raaigras	2m			1 Lolium perenne
Timoteegras	+			Phleum pratense
Straatgras	2m			Poa annua
Veldbeemdgras	2m			1 Poa pratensis
Ruw beemdgras	2m	1		2m Poa trivialis
vlinderbloemigen				vlinderbloemigen
Luzerne	r			Medicago sativa
Witte klaver	+			Trifolium repens
kruiden		kruiden		
Gewoon duizendblad	1			Achillea mullifolium
Fluitekruid	+			2m Anthriscus sylvestris
Bijvoet	+	+		Artemisia vulgaris
Herderstasje	r			Capsella bursa-pastoris
Gewone hoornbloem	1			Cerastium fontanum subsp. vulgare
Speerdistel		r		Circium vulgare

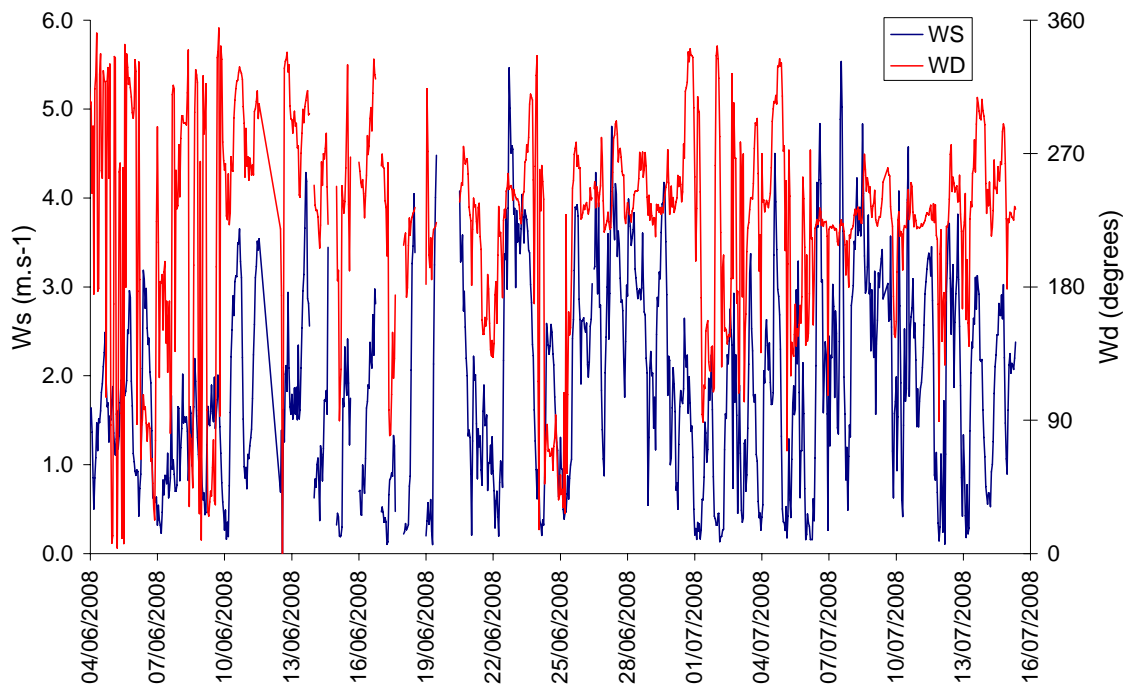
Kleefkruid		2a				Galium aparine
Slibbladige ooievaarsbek					r	Geranium dissectum
Gewone berenklauw	r					Heracleum sphondylium
Jacobskruid	r					Jacobaea vulgaris
Vertakte leeuwentand	1					Leontodon autumnalis
Echte kamille	r					Matricaria chamomilla
Bleke klaproos	1					Papaver dubium
Veenwortel	r					Persicaria amphibia
Perzikkruis	r					Persicaria maculosa
Smalle weegbree	1					Plantago lanceolata
Grote weegbree	1					Plantago major
Scherpe boterbloem					1	Ranunculus acris
Kruipende boterbloem	+					Ranunculus repens
Veldzuring	r				+	Rumex acetosa
Kruizuring	+				r	Rumex crispus
Ridderzuring					r	Rumex obtusifolius
Gewone raket	1					Sisymbrium officinale
Vogelmuur	+					Stellaria media
Paardebloem	1	+			1	Taraxacum officinale
Grote brandnetel	2m	1				Urtica dioica
Veldereprijs	+					Veronica arvensis
<b>houtigen</b>						<b>houtigen</b>
Eenstijlige meidoorn		+				Crataegus monogyna
Es	r		1	5		Fraxinus excelsior
Sleedoorn	+	2a	5		1	Prunus spinosa
Zomereik	r		+	2b		Quercus robur
Roos spec.		+				Rosa spec.
Gewone braam	+	2m			+	Rubus fruticosus

#### BraunBlanquet bedekkingschaal

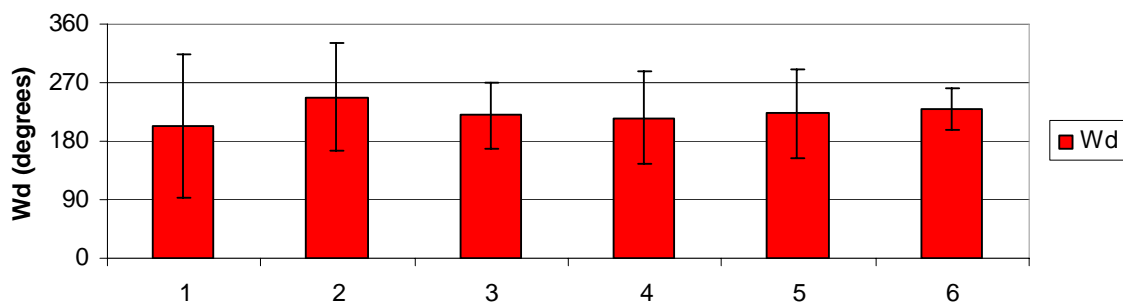
r	< 5% (1 expl.)
+	< 5% (2-5 expl.)
1	< 5% (6-50 expl.)
2m	< 5% (>50 expl.)
2a	5-12% (willekeurig aantal expl.)
2b	13-25% (willekeurig aantal expl.)
3	26-50% (willekeurig aantal expl.)
4	51-75% (willekeurig aantal expl.)
5	76-100% (willekeurig aantal expl.)

## Bijlage B Samenvatting resultaten metingen zomer en winter

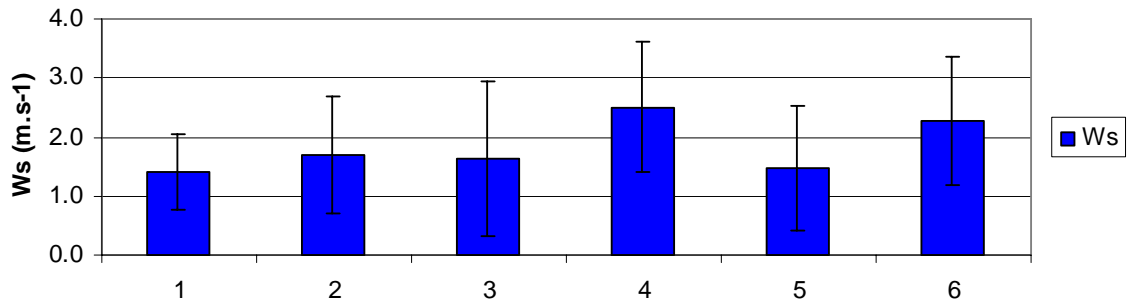
Meteorologie Zomer



Figuur B.1 Windsnelheid en windrichting op de achtergrondlocatie voor de gehele zomerperiode

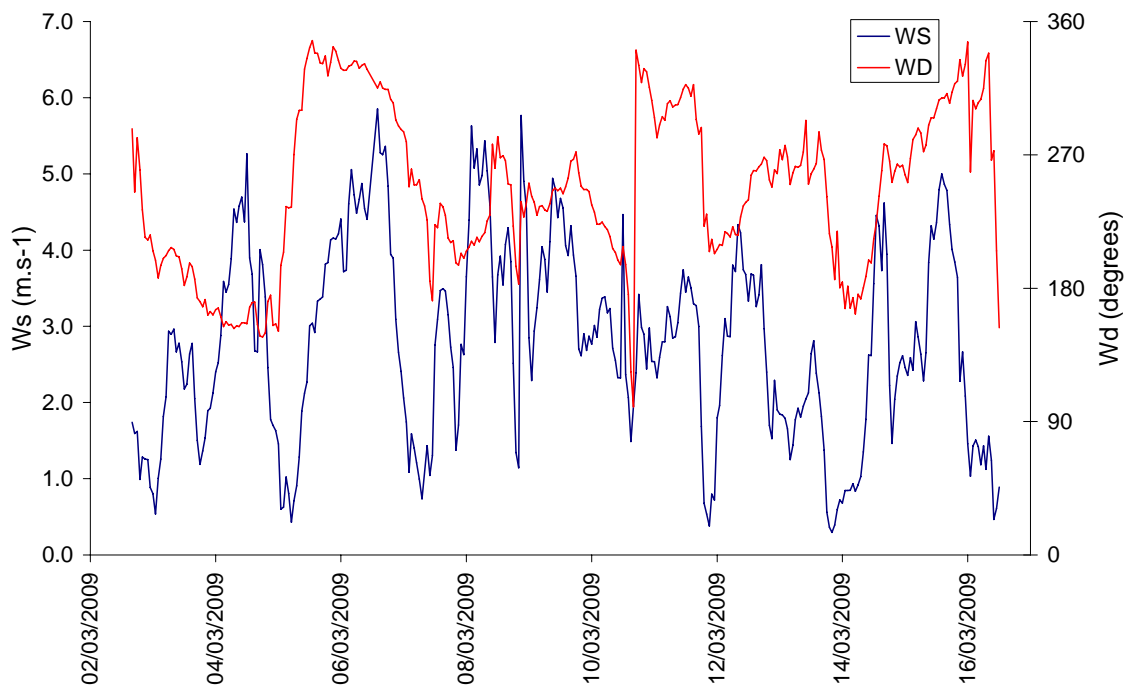


Figuur B.2 Windrichting op de achtergrondlocatie voor de gehele zomerperiode gemiddeld per week met de bijbehorende standaarddeviatie (Op de x-as staan de weeknummers weergegeven)



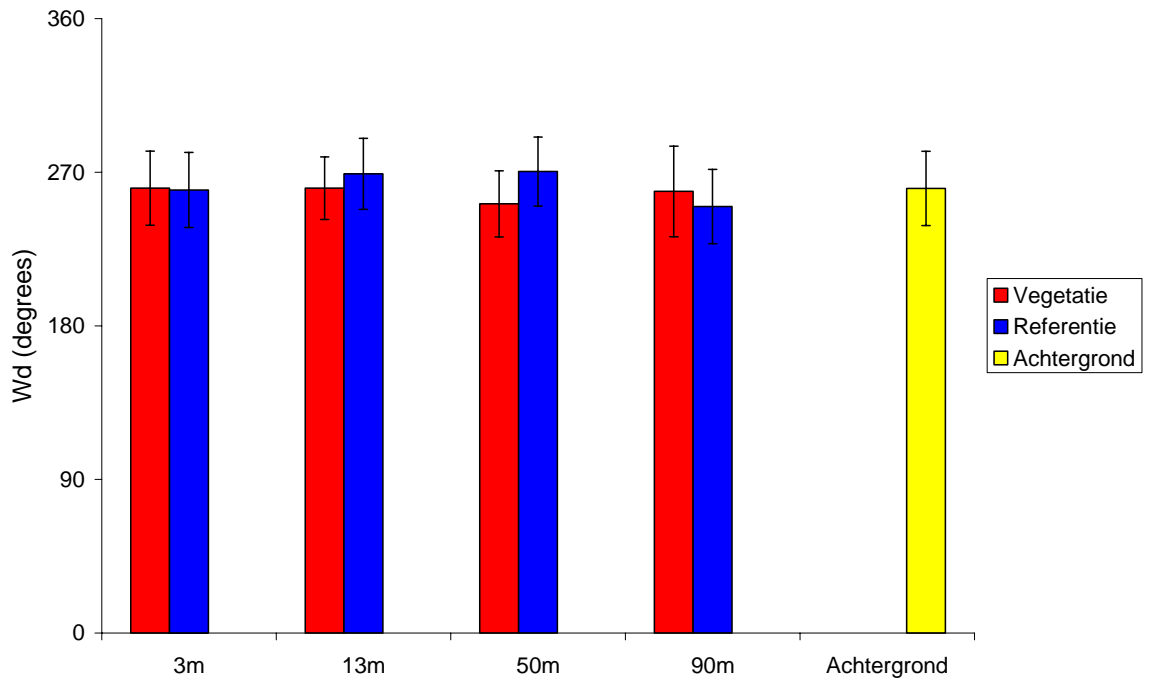
Figuur B.3 Windsnelheid op de achtergrondlocatie voor de gehele zomerperiode gemiddeld per week met de bijbehorende standaarddeviatie (Op de x-as staan de weeknummers weergegeven)

Meteorologie Winter

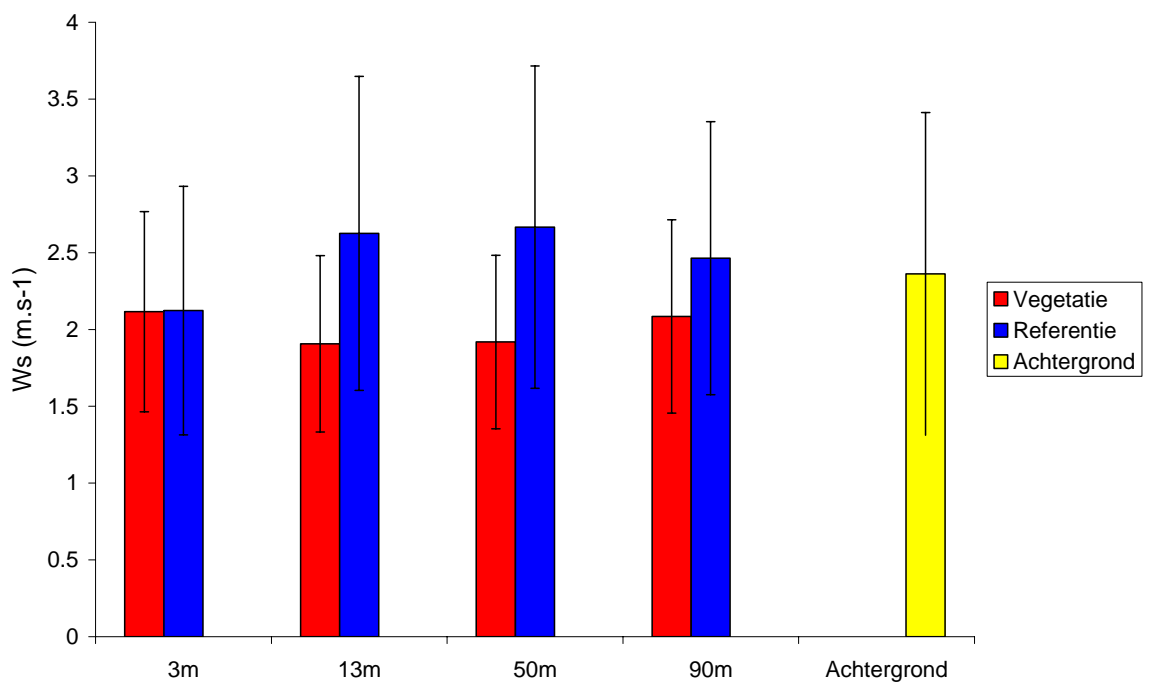


Figuur B.4 Windsnelheid en windrichting op de achtergrondlocatie voor de gehele winterperiode





Figuur B.5 Windrichting op de verschillende afstanden van de weg(x-as) voor vegetatielijn, referentielijn en achtergrondlocatie. Dit is een gemiddelde (met standaarddeviatie) voor de gehele winterperiode met windrichting 225-315 graden



Figuur B.6 Windsnelheid op de verschillende afstanden van de weg(x-as) voor vegetatielijn, referentielijn en achtergrondlocatie. Dit is een gemiddelde (met standaarddeviatie) voor de gehele winterperiode met windrichting 225-315 graden