



Energy research Centre of the Netherlands

Invloed vegetatie op de luchtkwaliteit

Eindrapport onderzoek naar de invloed van vegetatie op de luchtkwaliteit langs snelwegen

A. Kraai (ECN)

B. de Maarschalck (VITO)

A. Vermeulen (ECN)

Rapportnummer IPL-2a

Invloed vegetatie op de luchtkwaliteit

**Eindrapport onderzoek naar de invloed van
vegetatie op de luchtkwaliteit langs snelwegen**

Rapportnummer IPL-2a

Colofon

Titel	Invloed vegetatie op de luchtkwaliteit
Ondertitel	Eindrapport onderzoek naar de invloed van vegetatie op de luchtkwaliteit langs snelwegen
Rapportnummer	IPL-2a
Status	Definitief eindrapport
Datum van publicatie	december 2009
Opdrachtgevers	Ministerie van Verkeer en Waterstaat (V&W) Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM)
Uitgevoerd door	Rijkswaterstaat - Dienst Verkeer en Scheepvaart Afdeling Innovatie & Implementatie (MII) Innovatieprogramma Luchtkwaliteit (IPL)
Informatie	DVS-loket Tel. (088) 798 25 55 E-mail: dvsloket@rws.nl
Projectleiding	Aad van den Burg Gerrit Jan Schraa
Dit rapport is samengesteld door	Aline Kraai (ECN) Bart de Maarschalck (VITO) Alex Vermeulen (ECN)
Rapport downloaden	www.verkeerenwaterstaat.nl (actueel/publicaties)
Trefwoorden	Luchtkwaliteit, vegetatie, fijn stof, stikstofdioxide
Copyright	Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart, Delft 2009

Disclaimer

Dit rapport is opgesteld in het kader van het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit (2005 – 2009) dat in opdracht van de ministeries van Verkeer en Waterstaat en VROM werkt aan innovatieve oplossingen die bijdragen aan verbetering van de luchtkwaliteit op en rond snelwegen. Rijkswaterstaat voert het programma uit.

Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart (DVS), en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben de in deze publicatie opgenomen gegevens zorgvuldig verzameld naar de laatste stand van wetenschap en techniek. Desondanks kunnen er onjuistheden in deze publicatie voorkomen.

Rijkswaterstaat sluit, mede ten behoeve van degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die uit het gebruik van de hierin opgenomen gegevens mocht voortvloeien.

Inhoud

Samenvatting	5
Summary	6
1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Doel	7
1.3 Overzicht van de verrichtte onderzoeken	7
1.4 Overzicht van de rapportages	8
2 Onderzoek Vegetatie langs de snelweg	10
2.1 Opzet Onderzoek	10
2.2 Uitvoering metingen en modellering	13
3 Resultaten Metingen	24
3.1 Perceel I: Metingen aan bestaande vegetatie op locatie Vaassen	24
3.2 Perceel II: Metingen aangeplante vegetatie op locatie Valburg	29
3.3 Vegetatie als toepassing in geluidsschermen	30
4 Resultaten Modellering	31
4.1 De modellen: PANAIR en Envi-met	31
4.2 Modelresultaten	33
5 Conclusies en aanbevelingen	47
5.1 Inleiding	47
5.2 Conclusies op basis van de metingen	47
5.3 Conclusies op basis van de modelstudies	48
5.4 Aanbevelingen	49
Referenties	50
Bijlage A PerceelI Locatie Vaassen	52
Bijlage B Locatie perceel II (Valburg)	56
Bijlage C CD met alle rapportages	

Samenvatting

Vegetatie als maatregel voor verbetering van de luchtkwaliteit langs snelwegen is een sympathieke en maatschappelijk geaccepteerde maatregel. De effectiviteit van de maatregel is onderzocht in het kader van het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit (IPL), een samenwerking van de ministeries van VROM en V&W. Dit rapport vat de resultaten van een 17-tal rapporten samen die (mede) in dit kader zijn opgesteld. De rapporten betreffen literatuuronderzoeken; opzet, uitvoer en resultaten van proefmetingen; en de uitkomsten van modellering. Alle onderzoeken wijzen in de richting van een licht positief effect van vegetatie op de luchtkwaliteit op grotere afstand van de weg, ruwweg vanaf 50 meter van de rand van de weg, maar de onderzoeken hebben dit effect niet statistisch significant kunnen aantonen. Op kleinere afstand is doorgaans sprake van een verslechtering van de luchtkwaliteit. Vanaf een afstand groter dan 100 meter van de wegrand wordt het effect van vegetatie weer veel kleiner.

De invloed van naaldbomen blijkt sterker dan die van loofbomen. Loofbomen hebben ook als nadeel dat in de winter de hoeveelheid blad sterk afneemt en de porositeit toeneemt, hetgeen de positieve effecten op luchtkwaliteit doet afnemen.

Summary

The use of vegetation as a measure to improve air quality along roads is a friendly and for society easily accepted measure. The effectiveness of this measure has been the subject of research in the framework of the Dutch IPL. This report summarizes 17 reports in this framework containing literature reviews; experiments and model evaluations. All reports point at a slightly positive, but statistically not significant, effect of vegetation on air quality along the roads starting at distances of 50m from the verges. Slightly negative effects are found at distances closer to the road and the positive effects get much smaller at larger distances than 100m.

Influences of coniferous vegetation are found to be stronger than for deciduous vegetation. Deciduous vegetation also experiences loss of leaves which decreases effectiveness and increases the negative effects in winter-time.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

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 (zogenaamde "hot spots"). Daar werden en worden de normen voor luchtkwaliteit vaak verschreden en zal het (bron)beleid pas op termijn toereikend zijn om de luchtkwaliteit wat betreft vooral NO₂ en in mindere mate PM₁₀ voldoende 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.

Het IPL heeft meerdere maatregelen onderzocht die effect hebben of potentie tot effect hebben op de luchtkwaliteit langs de snelweg. Een van deze maatregelen is de inzet van vegetatiestroken langs de snelweg. Over het onderwerp 'Vegetatie' zijn vanuit het IPL 17 rapportages verschenen. In de nu voor u liggende rapportage zijn al deze rapporten samengevat (zie 1.4).

1.2 Doel

In het kader van het Innovatieprogramma 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. Doel van deze rapportage is om alle onderzoeken tot nu toe (17 rapportages en documenten) samen te vatten en hieruit een conclusie te trekken over de effecten van de maatregel 'Vegetatie' langs de snelweg.

1.3 Overzicht van de verrichtte onderzoeken

Het project is begonnen met een literatuuronderzoek door Peutz. Op basis van dit onderzoek is besloten een eerste praktijkonderzoek uit te voeren. Hiervoor is een geschikte locatie gezocht (A50 bij Vaassen). ECN heeft deze metingen uitgevoerd. Parallel hieraan is een workshop georganiseerd.

Er is door middel van deze workshop een start gemaakt om de gehele groensector in het project te betrekken. Dit heeft geresulteerd in het kennisdocument Vegetatie-luchtkwaliteit. Dit document is opgesteld voor het uitvoeren van een pilotproject langs rijkswegen.

Vervolgens is gestart met de organisatie van een prijsvraag waarin aan marktpartijen is gevraagd om voor twee locaties, een met bestaande en een met geoptimaliseerde vegetatie, een proefopzet te bedenken.

De aanbestedingsdocumenten die hiervoor zijn opgesteld, zijn besproken in de marktconsultatie. Daarna is de prijsvraag gelanceerd, en zijn opdrachten gegund voor twee onderzoeken op perceel II (Valburg) en I (Vaassen) en zijn de onderzoeken uitgevoerd.

In dit rapport worden van de diverse eindrapporten uit de verschillende fasen de belangrijkste conclusies samengevat.

1.4 Overzicht van de rapportages

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de voor deze samenvatting gebruikte IPL rapportages en documenten.

Overige referenties worden aangeduid door verwijzing met de letters van het alfabet. De volledige bronbeschrijvingen kunt u vinden in de literatuurlijst achterin dit rapport. De IPL-rapportages, zoals hieronder opgesomd, zijn tevens te vinden op de cd-rom achterin de kft.

[a] Regressietool ontwikkeld door RIVM voor intern gebruik, en mondelinge toelichting daarop door Beijck, 2009.

[b] Wesseling JP, J Duyzer, AEG Tonneijck, CJ van Dijk, 2004. Effecten van groenelementen op NO₂ en PM₁₀ concentraties in de buitenlucht. TNO, rapport R2004/383

[c] IPL Proeftuin Invloed Schermen op luchtkwaliteit.
<http://www.ipluchtkwaliteit.nl/project.php?name=schermwering>

[d] Hofschreuder P, F Tonneijck, E Hofschreuder., 2005. Optimalisatie van geluidsschermen voor verbetering van de luchtkwaliteit. Wageningen, A&F, rapport #

[1] Workshop Vegetatie-Luchtkwaliteit. 27 juli 2006 Bomen centrum Baarn. Verslag DWW-2006-070/IPL 06.00014

[2] Heslen JJG & Koopmans JFW, 2006. Actualisatie literatuuronderzoek "Beplanting en Luchtkwaliteit". Peutz, Rapport FL-17485-1.

[3] Swaagstra AH & PP de Kluiver, 2006. IPL pilot Effect op luchtkwaliteit van vegetatie langs snelwegen - Inventarisatie meetlocaties t.b.v. zomermeting. ES consulting, rapport.

[4] Burg A. Van den, Swaagstra H, Loef P, Broer W, Cohen G, 2006. Kennisdocument Vegetatie-luchtkwaliteit ten behoeve van het uitvoeren van een pilotproject langs rijkswegen. DWW 2006-094 /IPL 06.00019

[5] Weijers EP, Kos GPA, Bulk WCM van den & Vermeulen AT, 2007. Onderzoek naar de luchtkwaliteit rondom een vegetatiestrook langs de snelweg. ECN, Petten, rapport ECN-E--07-011

[6] Brochure prijsvraag vegetatie, juli 2007. DWW-2007-031.

[7] Voorstudie ten behoeve van het uitvoeren van een pilot project langs rijkswegen: Update en gevoeligheidsanalyse van de vegetatiemodule in het Envi-met model; J. Vankerkom, B. De Maerschalck, S; Janssen en Fred Tonneijck, VITO – Triple E, DVS-2008-001, December 2007.

- [8] Modelanalyse van de IPL meetcampagne langs de A50 te Vaassen ter bepaling van het effect van vegetatie op luchtkwaliteit langs snelwegen: Envi-met modelering van de ECN 2006 meetcampagne te Vaassen; S. Janssen, B. De Maerschalck, J. Vankerkom en J. Vliegen, VITO, DVS-2008-044, Juli 2008.
- [9] Vermeulen AT, A Kraai, JH Duyzer, EJKlok, AA Pronk, 2008. Ontwikkeldrapport perceel 1 prijsvraag vegetatie, maart 2008. Rapportnr. DVS-2008-026
- [10] Vermeulen AT, A Kraai, JH Duyzer, EJKlok, AA Pronk, 2009. Vegetatie voor een betere Luchtkwaliteit: Perceel I – A50 Vaassen., ECN – TNO – RPI, DVS-2009-012/ECN-O–09-016.
- [11] Ontwikkeldrapport perceel 2 prijsvraag vegetatie, juni 2008. Rapportnr. DVS-2008-028.
- [12] Vegetatie voor een betere luchtkwaliteit: Perceel II – A50 Valburg; Stadsregio Arnhem Nijmegen – KEMA – WUR – Alterra – Integralis PP BV – VITO, DVS-2009-019, Juli 2009.
- [13] Hooghwerff J & Heijden WJ van der, 2009. Aanvullende metingen met TEOM's langs de A50 bij Valburg-Heteren. M+P, IPL rapportnr DVS-006-2009.
- [14] Modelanalyse IPL meetcampagne langs A50 bij Vaassen, juli 2008. Rapportnr. DVS-2008-044 (VITO: 2008/IMS/R/241) door VITO
- [15] Verslag marktconsultatie te Groeneveld, mei 2007. Rapportnr. DWW-2007-030.
- [16] "Eindrapport Proeftuin Schermen", DVS-rapport DVS-2009-014, november 2009.
- [17] Invloed schermen op de luchtkwaliteit, Eindrapport onderzoek naar de werking van (geluids)schermen op de luchtkwaliteit langs snelwegen, december 2009, rapportnummer IPL-1a.

2 Onderzoek Vegetatie langs de snelweg

2.1 Opzet Onderzoek

Het voortraject van het onderzoek naar vegetatie langs de snelweg als een maatregel ter verbetering van de luchtkwaliteit bestond uit een workshop. Deze workshop werd bijgewoond door personen met de nodige kennis over het onderwerp of over een van de raakvlakken daarmee. Middels deze workshop, gehouden te Baarn op 27 juli 2006, is extra kennis met betrekking tot eisen en randvoorwaarden verkregen voor dit geplande project [1].

In de workshop is gediscussieerd over de bijdrage van vegetatie, welke luchtkwaliteitscomponenten mogelijk beïnvloed worden, de locatie -en vegetatiekeuze, meten en monitoren, modelleren, en de beoordeling van de bijdrage van vegetatie aan luchtkwaliteit. Een breed gedragen conclusie van de workshop was dat samenwerking tussen partijen (kennis- en adviesbureaus, modelontwikkelaars, overheid, groenleveranciers en ondernemers) essentieel is om de brede benodigde kennis te kunnen verwerven en inzetten. Daarnaast is het onderscheiden van fysische en biologische effecten essentieel in dit project.

Daarnaast heeft er een literatuuronderzoek plaatsgevonden naar de maatregel zelf [2], en is een kennisdocument opgesteld (december 2006) [4]. Op basis hiervan is weer een vervolg workshop georganiseerd; de marktconsultatie [15].

Ook werd parallel hieraan onderzoek gedaan naar diverse geschikte meetlocaties voor een praktijkproef [3].

2.1.1 Literatuuronderzoek

De literatuurstudie van het IPL op het gebied van vegetatie als maatregel ter verbetering van de luchtkwaliteit is uitgevoerd door Peutz [2]. Peutz had al eerder in 2000 een dergelijk onderzoek uitgevoerd en heeft deze voor het IPL geactualiseerd met nieuwe kennis op dit gebied.

Twee belangrijke conclusies kunnen getrokken worden uit deze onderzoeken. Ten eerste dat concrete en onderbouwde kwantificering van de invloed van vegetatie op de luchtkwaliteit ontbreekt. Ten tweede zijn er nog geen nauwkeurige rekenmodellen of programma's gevonden die een betrouwbare modellering kunnen uitvoeren van groenelementen langs wegen.

Uit de literatuur komt naar voren dat er een aantal belangrijke processen en omstandigheden zijn die een rol spelen. Allereerst zijn de windsnelheid en turbulentie van belang. Dit kan voor hogere concentraties aan luchtverontreiniging zorgen door windsnelheidsreductie direct achter de vegetatie, maar ook voor lagere concentraties aan luchtverontreiniging door verdunning achter de vegetatie door het turbulentie effect wat kan optreden door een bomenrij.

De structurele eigenschappen van een bomenrij, zoals porositeit, hoogte en breedte, zijn van groot belang voor de invloed op de luchtkwaliteit, meer dan de functionele eigenschappen zoals blad en soort. De porositeit is vooral van belang voor de windsnelheid achter een bomenrij. Een optimum voor windsnelheidsreductie is een porositeit van 35-50%. Het type vegetatie is belangrijk voor het verschil in afvangst. NO_x wordt het beste afgevangen of beter gezegd geabsorbeerd (opname) door loofbomen via de huidmondjes, fijn stof daarentegen het beste door

naaldbomen of loofbomen met ruw blad, door afvangst aan het bladoppervlak. Hierbij geldt tevens dat loofbomen het grootste effect zullen hebben in de zomer en dat naaldbomen het hele jaar door effect zullen hebben.

De mate van reductie of toename varieert duidelijk in de verschillende onderzoeken die zich op groen langs het hoofdwegennet richten; de invloed van bomen op luchtkwaliteit in de binnenstedelijke omgeving is beter bekend (en doorgaans negatief). In de literatuur is sprake van reducties tot 60% en van toenames tot 200%. Deze hogere percentages worden gevonden in modelmatige of meer ideale speciaal opgezette omstandigheden. In praktijksituaties beschreven in de literatuur worden reducties of toenames waargenomen die eerder in de orde van grootte van enkele procenten tot maximaal 10-20% liggen.

2.1.2 *Onderzoek naar geschikte meetlocatie*

Naar aanleiding van de bevindingen uit het literatuuronderzoek is besloten om door middel van eigen praktijkonderzoek in het kader van IPL tot een beter onderbouwing van de effecten van groen op de luchtkwaliteit langs snelwegen in de Nederlandse praktijk te komen.

Adviesbureau ES consulting heeft daartoe in 2006 een groot aantal kansrijke locaties geselecteerd, bezocht en gedocumenteerd wat de voor- en nadelen zouden zijn van de locaties voor het uitvoeren van metingen achter de plaatselijke vegetatie [3]. In totaal zijn 8 locaties nader uitgewerkt. In die documentatie is meegenomen wat de ligging en karakteristieken zijn van de groenstrook ten op zichte van de weg. Verder is gekeken naar de specifieke kenmerken van de locatie en de bereikbaarheid. Ook het windklimaat is uitgewerkt om uiteindelijk tot een conclusie te komen. De uitwerking van de uiteindelijke meetlocatie Vaassen is in bijlage A van de voorliggende rapportage opgenomen.

2.1.3 *Kennisdocument en Marktconsultatie*

Het kennisdocument [4], dat in 2006 is ontwikkeld door verschillende partijen op dit gebied, is een basisinformatievoorziening voor de verdere voortgang van het project. Gedurende de marktconsultatie in mei 2007 [15] is dit document besproken en als input aangeboden voor de uitvoer van de prijsvraag.

In de marktconsultatie [15] zijn meerdere presentaties aan bod gekomen. Het gemeenschappelijke doel van de praktijkproeven dat hieruit naar voren is gekomen is: Het op basis van luchtkwaliteitsmetingen op een proeflocatie langs de rijksweg genereren van gevalideerde modelsimulaties die het effect van vegetatie op luchtkwaliteit zo goed mogelijk omschrijven.

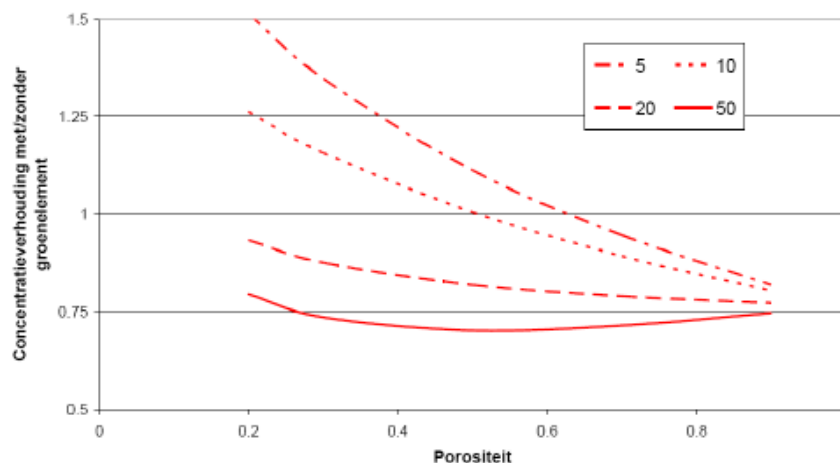
Belangrijk hierbij is het verbeteren van de lokale luchtkwaliteit, het realiseren van een gedetailleerd model en het beschrijven van de vegetatie. In de marktconsultatie werd ook duidelijk aangegeven dat een gerichte marktbenadering belangrijk wordt bevonden.

In het kennisdocument wordt aangegeven dat groenelementen positieve en negatieve effecten hebben en dat dit afhankelijk is van de optische porositeit van het groen en van de grootte van de deeltjes (zie figuur 1). Groenelementen kunnen, op basis van een simpel theoretisch model, circa 15-20% van het aanbod van PM_{10} afvangen onder gemiddelde meteorologische omstandigheden. Daarnaast kan het groenelement ook de windsnelheid verminderen, waardoor de emissies in minder lucht wordt gemengd en de concentraties juist toenemen. Overigens mag men de curves in figuur 1 niet zonder meer extrapoleren voor waarden van de porositeit

boven de 0.9. Bij een porositeit van 1.0 (geen vegetatie) is de concentratieverhouding (op de y-as uitgezet) natuurlijk per definitie 1.0.

Figuur 1

Effect op de concentratie achter het element als functie van de optische porositeit. De legende in de figuur geven de diameters van de deeltjes aan in μm
Bron: [b]



Biologische interacties van de verschillende stoffen.

In het kennisdocument wordt tevens duidelijk gemaakt dat stikstofdioxide (NO_2) wordt opgenomen via het proces absorptie, dat wil zeggen dat er opname plaatsvindt via de huidmondjes en eventueel via het bladoppervlak. De factoren die de opening van de huidmondjes beïnvloeden zijn lichtintensiteit en watervoorziening van het blad. Brede en dunne bladeren van loofbomen nemen meer NO_2 op doordat deze bladeren beschikken over veel actieve huidmondjes.

Ozon (O_3) ontstaat op regionale schaal door de invloed van licht op luchtverontreiniging als NO_x en Vluchtige Organische Stoffen (VOS). Ozon kan op dezelfde manier als NO_2 heel effectief door planten worden opgenomen. De hogere reactiviteit van O_3 aan het oppervlak van en in de plant leidt tot lagere interne weerstanden dan voor NO_2 , en O_3 zal daarom nog beter opgenomen worden. Blootstelling aan hoge concentraties O_3 kan ook een negatief effect hebben op de opname door planten, doordat het de cuticula van de plant aantast waardoor de huidmondjes beschadigen.

Verkeer emitteert naast NO_x ook andere luchtverontreinigende componenten zoals VOS. VOS zijn relevant omdat de meeste componenten van VOS schadelijk zijn voor de gezondheid en leiden tot vorming van meer O_3 en secundair aerosol. De huidige normen voor NO_2 zijn vastgelegd omdat deze stof beschouwd wordt als een tracer voor verkeersemisies, die schadelijk worden geacht voor de gezondheid, zoals roet en VOS. NO_2 is zelf redelijk eenvoudig te meten, hetgeen niet geldt voor de grote groep van verbindingen in de VOS groep. Het zou een prettige bijkomstigheid zijn als de reducties in NO_2 concentraties bij maatregelen om te voldoen aan de normen voor luchtkwaliteit ook daadwerkelijk positief uitpakken voor de voor gezondheid werkelijk belangrijke stoffen.

VOS kunnen door planten worden opgenomen en accumuleren. Deze kunnen door de huidmondjes worden opgenomen (absorptie), maar ook opgenomen worden door de cuticula. Bladeren met een dikke cuticula, zoals naalden van coniferen, zijn zeer geschikt voor het wegvangen van VOS. Indien NO_2 wel en andere componenten in uitlaatmissies niet door bomen wordt opgenomen is het effect van de bomen op de

gezondheid derhalve beperkt en wellicht misleidend, NO₂ is immers een signaalstof voor andere componenten van luchtkwaliteit die wel een causale relatie met gezondheid hebben [e].

Fijnstof wordt door planten afgevangen doordat ze direct in contact komen met het blad of dichtbij genoeg komen zodat de deeltjes elektrostatisch worden aangetrokken door het bladoppervlak (adsorptie) waarna impactie optreedt. Deze depositie is optimaal wanneer de bladeren vochtig zijn, een ruw/behaald oppervlak hebben en elektrostatisch geladen zijn. Het stof kan ook weer door neerslag of hoge windsnelheden van het blad verwijderd worden. Coniferen zijn effectiever in het afvangen van fijn stof dan de bladeren van de loofbomen, dit komt door de spitse vorm van de naalden waardoor meer aanhechting kan plaatsvinden.

Vegetatie heeft ook mogelijke toepassingen op geluidsschermen [16,17]. De conclusies uit het IPL onderzoek rond de effectiviteit van geluidsschermen zal daarom ook kort aan bod komen in dit rapport.

2.2 Uitvoering metingen en modellering

2.2.1 Metingen langs de snelweg

Nadat uit literatuuronderzoek is gebleken dat vegetatie een positieve bijdrage kan hebben op de luchtkwaliteit, is vanuit het IPL besloten praktijkproeven uit te laten voeren.

In eerste instantie zijn metingen verricht bij de locatie Vaassen langs de A50. Deze metingen zijn uitgevoerd door ECN in zomer/najaar van 2006. Deze pilotstudie [5] diende als opmaat voor een tweede breder opgezette meetcampagne. De pilotopzet was met name bedoeld om verschillen in windsnelheid en concentraties van NO_x en CO₂ en fijn stof vast te stellen in en om een vegetatiestrook. Metingen zijn uitgevoerd op een afstand van 3, 10, 45 en 90m vanaf de snelweg en de dataset beschikt over 5 meetdagen.

Na deze pilotstudie heeft IPL een prijsvraag uitgezet voor twee opdrachten om nieuwe metingen te verrichten in zomer en winter en wel met continue metingen. Hierbij waren twee opdrachten te vergeven voor twee verschillende percelen. In de prijsvraag [6] werd het doel van de twee meetlocaties als volgt beschreven:

"Vanaf februari 2008 dienen, in een voor het project ingerichte proeflocatie in Vaassen (perceel 1) of op een door de inschrijver te bepalen locatie (perceel 2), metingen aan de vegetatie te worden verricht en dient het gerealiseerde model te worden gevalideerd.

PRIJSVRAAG

Het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit wil marktpartijen daarom, middels een prijsvraag, uitnodigen om ideeën en oplossingen aan te dragen voor vegetatie die een zo groot mogelijk positief effect heeft op de luchtkwaliteit. Per geselecteerd idee wordt een budget beschikbaar gesteld

Het doel van perceel 1 van dit pilotproject is om, op basis van luchtkwaliteitsmetingen op de proeflocatie, gevalideerde modelsimulaties te genereren die het effect van de daar aanwezige vegetatie op luchtkwaliteit zo goed mogelijk weergeven.

Voor perceel 2 dient de opdrachtnemer vegetatie voor een betere luchtkwaliteit te ontwerpen/ontwikkelen op een door hem te selecteren locatie langs een snelweg.

De opdrachtnemer van perceel 2 dient vervolgens gevalideerde modelsimulaties te genereren die het effect van de door hem ontworpen vegetatie op luchtkwaliteit zo goed mogelijk omschrijven.

Perceel 2 omvat dezelfde werkzaamheden als perceel 1. Perceel 2 is echter meer uitgebreid in de zin dat de opdrachtnemer hiervoor zelf een proeflocatie langs een snelweg dient te zoeken en de vegetatie voor deze proeflocatie zelf dient te ontwerpen/ontwikkelen en te realiseren."

De locaties van Perceel I (Vaassen) en II (Valburg) zijn weergegeven in figuur 2. De metingen hebben op beide locaties aan oostzijde van de weg plaatsgevonden met aan de westzijde een achtergrondlocatie. Dit doordat de overheersende windrichting zuidwestelijk is in dit gebied, zodat deze ligging de meeste kans op goede data zal opleveren.

Figuur 2

Locaties perceel I en II bij
Vaassen en Valburg
Bron: Google Earth



2.2.2

Perceel I: Vaassen

Perceel I is uitgevoerd op dezelfde locatie als de pilotstudie langs de A50 bij Vaassen. De opdracht is uitgevoerd door het consortium ECN, TNO en PRI [9,10]. Hier zijn zes weken zomermetingen uitgevoerd in de periode van juni-juli 2008. De wintercampagne heeft plaatsgevonden in de eerste twee weken van maart 2009. Tijdens deze studie zijn continue metingen aan NO_x O₃ en PM uitgevoerd, dat wil zeggen 24 uur per dag. Dit is een groot verschil met de pilotstudie in 2006. In 2006 zijn de meetinstrumenten neergezet wanneer er westenwind werd voorspeld en werden de metingen alleen bij daglicht uitgevoerd. Hierdoor konden geen lange meetreeksen worden verkregen en ook geen 24-uurs metingen.

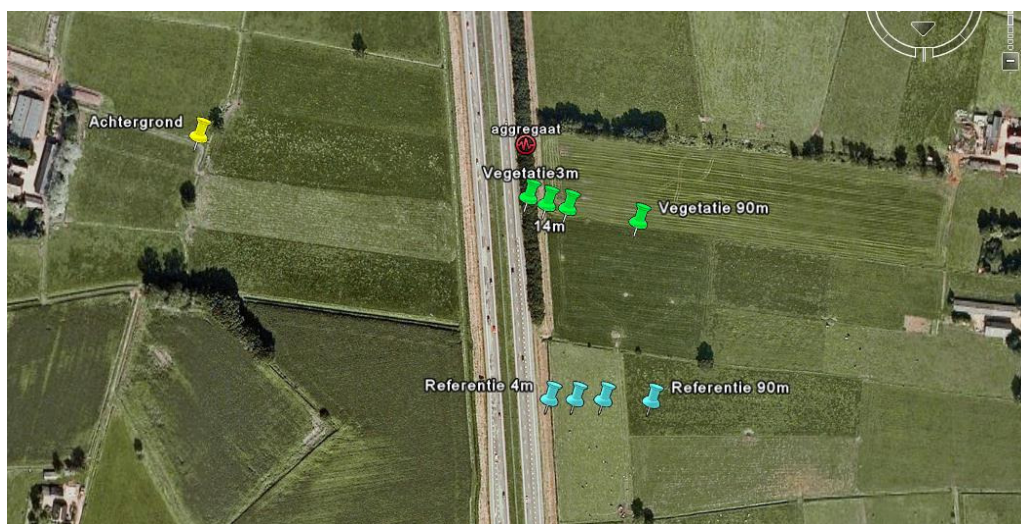
In 2008/2009 is ook meer aandacht geschonken aan de vegetatie zelf, hier zijn metingen aan uitgevoerd om de geleidbaarheid van de huidmondjes te meten en ook om de optische porositeit van de vegetatiestrook te bepalen. Deze metingen zijn uitgevoerd door PRI [12].

In Vaassen zijn tussen de twee studies, dus in de pilotstudie van 2006 en studie in 2008, een groot aantal overeenkomsten. De metingen hebben plaatsgevonden aan

de oostzijde van de weg aan één strook met vegetatie en één zonder. De bestaande vegetatie is een rij loofbomen met vooral es en zomereik van gemiddeld 13,5 meter hoog en een struiklaag bestaande uit sleedoorn en bramen; daaronder is nog een kruidlaag aanwezig. De bomenrij was 4 rijen dik maar er is dunning opgetreden wat geen strakke bomenrij opleverde.

Figuur 3

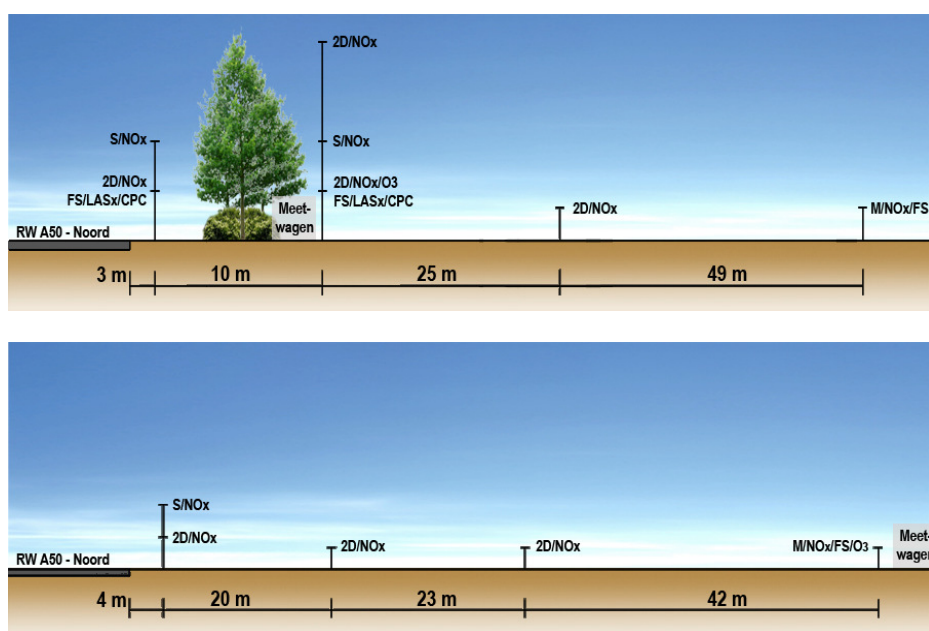
Luchtfoto (Bron: Google Earth) van de locatie perceel I langs de A50 bij Vaassen met daarin aangegeven de receptorpunten, zie verder tekst (Bron: [10]).



De afstanden waarop is gemeten zijn ongeveer 3, 10, 45 en 90m vanaf de weg. De masten op 3m zijn 6m hoog. Op 10m afstand (achter de vegetatie) zijn de masten 12m hoog (in 2006: 6m). De masten op 45 en 90m afstand zijn 2m hoog. De situatie zoals deze in de zomer 2008 is opgesteld is weergegeven in bovenaanzicht in figuur 3 en in schematisch zijaanzicht in figuur 4. In de winter van 2009 is alleen op 2m hoogte gemeten. Verder is in 2008/2009 ook een achtergrondlocatie op een locatie aan de westzijde van de weg gemeten op 2 m hoogte. Dit is ongeveer op 200m van de snelweg A50.

Figuur 4

Schematische opstelling van strook met vegetatie(boven) en zonder vegetatie(onder) in zomer 2008. (S=3d-sonic, 2D=2d-windsonic, M=mierij, $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$, FS=fijn stof met TEOM en Osiris, LASx en CPC, zie tekst. Ieder transect en de achtergrond gebruiken meetkeet of meetwagen voor instrumentatie



Op al deze locaties is windsnelheid en windrichting gemeten met verschillende meetsystemen, waaronder 3d en 2d sonische anemometer (windmeters op basis van ultrasoon geluid of hittetransport, zonder bewegende delen en met hoge nauwkeurigheid). Op de achtergrondlocatie zijn ook andere meteorologische parameters, zoals temperatuur, druk etcetera, bepaald met een Vaisala all weather systeem. Verder is in beide studies op deze locaties NO en NO₂ gemeten met een chemoluminescentie principe (type monitor is EcoPhysics CLD 700AL). Op verschillende hoogtes en afstanden zijn deze gassen gemeten door aanzuigen via leidingen en sequentiële bemonstering door middel van een kleppenkast.

Fijn stof is ook in beide campagnes gemeten al is dit in de twee campagnes verschillend aangepakt. In 2006 is met twee Laser Aerosol Spectrometers (LASx) PM₁₀ en PM_{2.5} bepaald. Een LASx heeft op een vaste locatie vóór de vegetatie gemeten en met de andere LASx is rondgereden en op verschillende afstanden de concentratie bepaald áchter de vegetatiestrook en langs de referentielijn. In de zomer van 2008 is ook met de LASx gemeten maar hiermee alleen voor en achter de vegetatie vanaf een plek door aanzuiging en sequentiële bemonstering. De PM₁₀ concentratie is ook bepaald aan de hand van metingen met TEOMs. Deze hebben bestaan op de achtergrondlocatie, in vegetatielijn op 3, 10 en 90m en op 90m in referentielijn. In winter 2009 hebben geen PM metingen plaatsgevonden.

In de zomer van 2008 is ook op drie punten O₃ gemeten, namelijk op de achtergrond en achter de vegetatie en aan de referentie zijde. In de wintercampagne van 2009 is alleen op de achtergrondlocatie gemeten.

Data verwerking van de pilotstudie 2006:

In totaal zijn 5 meetdagen verkregen met correcte metingen en gunstige windrichting, welke 215° -305° is en daarnaast droge omstandigheden. Voor het verschil in gemeten concentraties op de referentie- en vegetatielijn is voor de tijdreeksen getest op statistische significantie (p-waarde: 0,05). Hieruit is voor de verdere verwerking de data genormaliseerd naar het punt voor de vegetatie.

Data verwerking campagne zomer 2008/winter 2009:

Voor Perceel I zijn 6 weken in de zomer metingen verricht en 2 weken in de winter. De verkregen data is voor de interpretatie gemiddeld naar uurlijkse data en er is een bijdrage berekend door de totale concentratie te verminderen met de achtergrondconcentratie. De concentratiedata voor NO_x waren een belangrijk zorgpunt omdat referentie- en vegetatielijn erg grote verschillen lieten zien in situaties met oostelijke aanstroming, wanneer de beide gasmonitoren identieke waarden zouden moeten aangeven omdat er geen invloed van lokale bronnen te verwachten is. Op deze data is daarom een correctie toegepast door middel van een referentieleiding. Deze leidingen zijn gelijk in lengte en geplaatst op een zelfde punt aan de weg, maar gaan vanaf daar naar een verschillende monitor. Aan de hand van deze data is een tijdsafhankelijke correctie berekend uit de verhouding van de concentratiemetingen van de twee monitoren op gelijke tijdstippen voor het referentie aanzuigpunt. Deze data zijn vervolgens verwerkt met de regressieanalyse tool van het RIVM [a]. Deze analyse tool bestaat uit een Excel spreadsheet en VBA scripts en is ontwikkeld door RIVM voor de dataverwerking in het proeftuinproject, waarbij de invloed van geluidsschermen op luchtkwaliteit wordt onderzocht [c].

De selectie die is gemaakt is gebaseerd op de gegevens in de meest extreme situatie, namelijk in de spits, welke is aangenomen van 6:00-9:00 en van 16:00-19:00. Verder is er een selectie toegepast op de windrichting, namelijk van 210-

270° in de zomercampagne, in de wintercampagne is dit meer loodrecht op de weg namelijk 225-315°, de weg loopt op de locatie praktisch Noord-Zuid. In de zomer lijkt het of de metingen worden beïnvloed door het aggregaat wat ten noorden van de meetopstelling is geplaatst, daarom is de keuze in de windrichting hiervoor iets aangepast.

In het volgende wordt de gebruikte apparatuur iets verder toegelicht.

NO_x

De gebruikte NO_x monitoren zijn van het type Eco Physics CLD 700 AL. Het zijn NO-NO₂-NO_x 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_x (NO+NO₂) mogelijk zijn.

De kalibratie van de gebruikte CLD monitoren met gas standaarden is verricht bij TNO met ijkgasen met 280 ppb NO en 345 ppb NO₂; 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_x-apparatuur verbonden met leidingen naar één gemeenschappelijke inlaat.

O₃

Voor de O₃-metingen is gebruik gemaakt van monitoren gebaseerd op UV adsorptie (Monitor Labs (8810)). O₃ zal een deel van UV licht absorberen wanneer deze wordt blootgesteld. De intensiteit hiervan is een directe maat voor de O₃-concentratie. De UV lichtbron is een 254 nm emissielijn van een kwik afscheidende lamp. Ook de O₃ monitoren zijn voor en na beide campagnes gekalibreerd, nu met behulp van gasfasetitratie in het laboratorium van TNO. De nauwkeurigheid van de O₃ monitoren is enkele ppb/μg/m³.

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 PM₁₀ concentratie in de lucht te meten. De TEOM mag gemiddeld gerelateerd worden aan de gravimetrische referentiemethode door een correctiefactor van 1.3 te gebruiken (Meetregeling luchtkwaliteit 2005, VROM). Deze factor kan echter van locatie tot locatie iets variëren.

Op de vijf locaties waar de TEOM's hebben gestaan zijn ook Osirissen geplaatst voor vergelijking en PM_{2.5} metingen. De Osiris zuigt buitenlucht aan, via een verwarmde inlaat zonder voorafschieding 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 (PM₁₀, PM_{2.5}). 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 zogenaamde 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 gekalibreerd in een daarvoor speciaal gemaakte ruimte waarin deeltjes van één vooraf 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.

Aanzuigstelsysteem

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 per transect 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.

2.2.3

Perceel II: Valburg

De andere locatie is gekozen ten noorden van knooppunt Valburg op de A50. De opdracht om de effecten van dit perceel (II) in kaart te brengen is uitgevoerd door het consortium van Stadsregio Arnhem Nijmegen, KEMA, WUR-Animal Science Group, WUR-Meteorologie en Luchtkwaliteit, WUR-Alterra en Integralis PP BV. Perceel II had naast het uitvoeren van luchtkwaliteitsmetingen ook als opdracht om een vegetatiestrook te ontwikkelen en aan te planten. De meetopzet is beschreven in [11].

Figuur 5

Zicht kijkend naar het noorden op de oostzijde van meetlocatie perceel II met van links naar rechts de naaldbomen, de loofbomen, het vegetatieloze gedeelte ligt achter de fotograaf. Duidelijk zichtbaar is de aangebrachte aarde langs het talud van de snelweg en gele slangen voor de watervoorziening (Bron: [11])

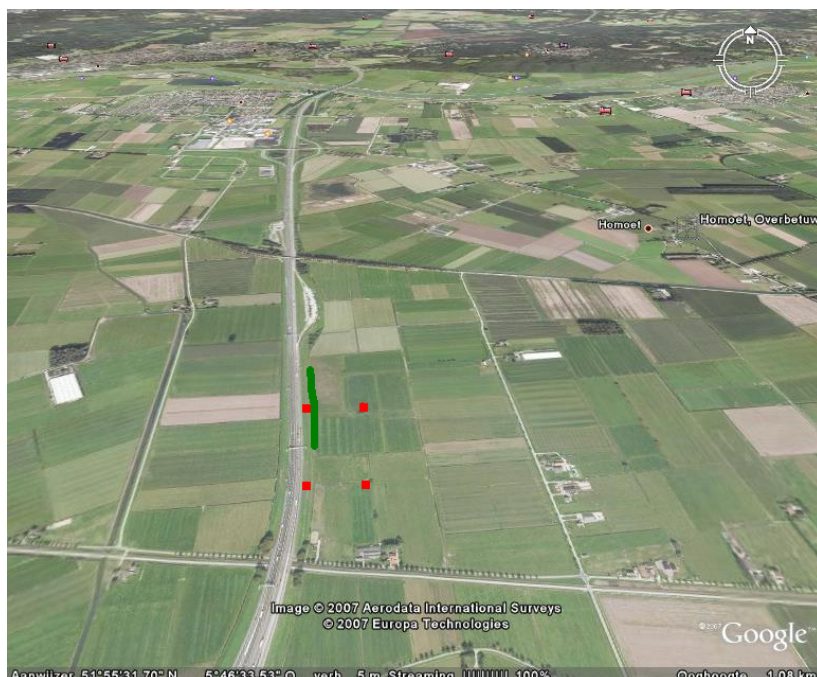


Verschillende eisen voor de locatiekeuze hebben geleid tot de locatie bij Valburg. Enige aanpassingen waren nodig aan de omgeving en de infrastructuur om deze locatie te kunnen creëren. Om een vlak terrein te creëren is langs de snelwegtalud 10000 m³ zand gestort. Deze grond diende ook geschikt te zijn voor de aanplant van de loof- en naaldbomen. Extra watervoorziening is aangesloten door een bron te slaan. Dit om de beplanting te kunnen bevoorraden via een waterdruppelsysteem. Elektriciteitsvoorziening was een tijdelijke aansluiting via een NUON-kast, op de locatie aangelegd om de watervoorziening en meetapparatuur van elektra te kunnen voorzien (zie figuur 5).

De aanplant van de vegetatie moest aan een aantal criteria voldoen om de effecten op de luchtkwaliteit te kunnen meten en beoordelen. Dit betekent dat de metingen uitvoerbaar moeten zijn, en de aanplant beschikbaar; daarnaast moeten de plantensoorten over een zo groot mogelijke opname- en invangcapaciteit beschikken. Verder zijn de kwaliteit van de bomen en struiken van belang en ook de afmetingen. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving (PPO), onderdeel van Wageningen UR, is betrokken geweest bij het zoeken naar de juiste beplanting. Om het verschil in effecten tussen loof- en naaldbomen te bepalen is er voor gekozen om een rij naaldbomen en een rij loofbomen te plaatsen. Deze stroken zijn elk 100m lang en 10m breed. De naaldbomenstrook wordt gevormd door een strook van 80 stuks *Pinus Sylvestris* van 7m hoog en 3m breed. Deze strook heeft geen onderbegroeiing nodig doordat de bomen tot onder aan toe zijn vertakt. De strook met loofbomen bestaat uit 95 stuks zilverlinden (*Tilia Tomentosa*) van 9m hoog en 3m breed, met als onderbegroeiing laurierkers (300 stuks) van 3m hoog en 1m breed en als bodembedekker is braam (3000 stuks) aangeplant. De plantafstand van de huidige opstelling van bomen en struiken is zo gekozen, aan de hand van een simulatie, dat de porositeit van de beplanting tussen de 30 en 40% ligt (zie figuur 6).

Figuur 6

Luchtfoto (Bron: Google Earth) van de omgeving van perceel II met in donkergroen aangegeven de plek van de beplantingszone. De rode vierkanten geven receptorpunten voor de metingen weer (Bron: [11])

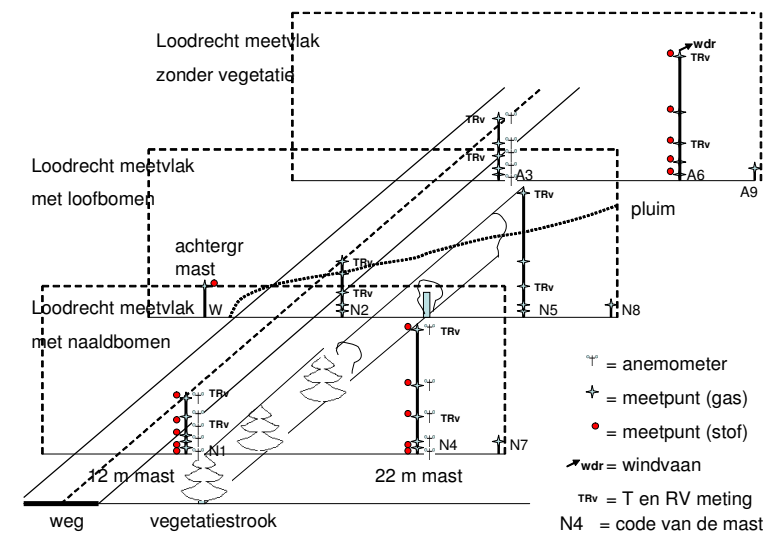


Wageningen Universiteit heeft de luchtkwaliteitsmetingen uitgevoerd en het effect bepaald van vegetatie op de NO_x -concentratie en PM. De metingen zijn gestart in mei 2008. In de periode van 1 juli 2008 tot 1 december 2008 zijn de metingen continu uitgevoerd. De meetopzet staat afgebeeld in figuur 7.

Naast de referentie en vegetatiemetingen, zoals afgebeeld, is aan de westzijde van de weg ook nog een achtergrondlocatie ingericht met een gas- en fijn stofmeting. Aan de oostzijde zijn fijnstofmetingen met DustTraks uitgevoerd op de twee masten voor en achter de vegetatie en op de 20 m mast op de referentielocatie. Telkens is voor en achter één type vegetatie tegelijk gemeten, met regelmatige wisseling van naaldbomen naar loofbomen en terug. Voor de metingen aan de NO_x -concentratie is de monsterinlaat van de monitoren van de ene set continu doorgezogen monsterleidingen naar de andere set continu doorgezogen monsterleidingen overgezet. De leidingen die hiervoor zijn gebruikt, zijn verwarmd en voorzien van een teflon inlaatfilter. Voor de aerosolmetingen en windsnelheidsmetingen zijn alle meetinstrumenten van de ene serie masten naar de andere serie masten achter de vegetatie overgebracht. De metingen aan dezelfde kant van de weg in het vrije veld gingen als referentie continu door. De metingen voor CO_2 waren opgezet om als indicator van verkeersemissies te dienen, maar helaas vertoonden de (oude) CO_2 monitoren teveel uitval waardoor de resultaten niet bruikbaar zijn voor analyse.

Figuur 7

Meetopzet en codering
Perceel II bij Valburg
(bron: [11])



Code	Plaats	Code	Plaats	Code	Plaats
N1	10 m mast aan vangrail voor dennen	N4	20 m mast achter dennen	N7	1.5 m mast 80 m achter dennen
N2	10 m mast aan vangrail voor linden	N5	20 m mast achter linden	N8	1.5 m mast 80 m achter linden
A3	10 m mast aan vangrail referentie (zonder vegetatie)	A6	20 m mast referentie (zonder vegetatie)	A9	1.5 m mast 80 m referentie (zonder vegetatie)

Meteorologische metingen om de energiebalans te bepalen zijn op het meteo-station Haarweg gemeten. Deze locatie ligt op 9km van de meetlocatie. Ook is hier met een sonische anemometer gemeten om parameters als wrijvingssnelheid (u^*) en voelbare warmtestroom te bepalen om de atmosferische stabiliteit te bepalen. Verder zijn ook de neerslaggegevens op de Haarweg meegenomen vanwege de invloed van regen op de aerosolconcentraties. Windsnelheidsmetingen zijn op verschillende punten op de masten op de locatie bepaald en windrichting alleen op 20m hoog op de referentiemast. Leaf Area Density (LAD) metingen zijn uitgevoerd aan de vegetatie met een optische en destructieve methode.

Data verwerking Perceel II:

De windrichting waarvoor de metingen zijn gebruikt zijn $215-305^\circ$ dat wil zeggen loodrecht op weg plus of min 45 graden. Voor deze windrichting sector zijn in het project in totaal 1427 uur aan data verkregen, welke zijn ingedeeld in Pasquill stabiliteitsklassen A-F.

Voor de NO_x -concentraties zijn de extreme concentraties verwijderd door de waarden hoger dan 2 maal de standaarddeviatie van het gemiddelde uit te sluiten. Voor de berekening van de flux worden wel alle waarden meegenomen. Het verwijderen van de extremen is gerechtvaardigd bijvoorbeeld als men deze kan wijten aan afwijkingen in de meetapparatuur, deze databehandeling moet dan natuurlijk wel consequent gebeuren, dat is hier niet het geval.

De data-analyse is gebaseerd op de massabalans-methode. Dit is de integratie van het product van windsnelheid en concentratie met de hoogte.

Om de concentraties voor vegetatie en referentie met elkaar te kunnen vergelijken moet eerst worden gecorrigeerd voor systematische verschillen tussen de twee monitoren aan de oostzijde van de weg. De meetresultaten zijn tegen elkaar uitgezet onder condities van oostenwind en er is een correctie toegepast op de monitor aan de referentiezijde.

Data van de DustTraks zijn niet gebruikt om een effect aan te geven van vegetatie op de luchtkwaliteit. Dit bleek onmogelijk omdat de DustTraks worden beïnvloed door het vochtgehalte in de atmosfeer. Door verdamping van vocht door de begroeiing neemt het vochtgehalte en daarmee de massa van de deeltjes toe. Correctie met de TEOMdata is ook niet mogelijk omdat gedurende de referentiemetingen ook een verschil tussen referentiemeting en TEOM-meting is opgetreden. Mogelijk zijn hiervoor verliezen die optreden door droging door verwarming in de TEOM en ook fouten die optreden door meewegen van onvoldoende verwijderd vocht gehecht aan hygroscopisch aerosol. Deze onvoldoende droging kan optreden bij hoge vochtigheid bij hoge temperaturen.

Ingenieursbureau M+P heeft apart van de metingen die Wageningen Universiteit heeft uitgevoerd ook nog metingen voor PM_{10} uitgevoerd, maar dan met TEOMs. Deze metingen zijn uitgevoerd van september tot december 2008 op de locatie Valburg. Hierbij is alleen gekeken naar het effect van de naaldbomen en niet naar die van de loofbomen. De resultaten zijn beschreven in een aparte IPL-rapportage [13] en een samenvatting hiervan is in hoofdstuk 3 meegenomen. De metingen zijn uitgevoerd met 4 TEOMs op de achtergrondlocatie, voor de dennen op 20m vanaf de weg en op de referentiezijde. De PM_{10} -data verkregen met de TEOMs is omgerekend naar een wegbijdrage met behulp van het achtergrondpunt. De windrichting waarover de data is gebruikt is $200-320^\circ$. Deze winddata zijn niet de gemeten windgegevens op de locatie zelf, maar verkregen via het archief van weeronline.nl. Voor de analyse van de uur-data is gebruik gemaakt van orthogonale regressie, waarbij wordt gekeken naar het intercept wanneer de lijn niet door nul wordt gedwongen.

2.2.4 *Modelanalyse van de meetcampagnes en gevoeligheidsanalyses aan de hand van CFD-modellen*

Parallel aan de meetcampagnes zijn ook een aantal uitgebreide modelanalyses uitgevoerd om een breder inzicht te krijgen in de werking van de vegetatie met betrekking tot lokale luchtkwaliteit. Het doel van deze analyses was tweeledig: Enerzijds het toetsen van het model aan de beschikbare meetgegevens om de modellen te valideren en indien nodig te optimaliseren. Anderzijds kunnen de gevalideerde modellen bijdragen tot een beter inzicht in de verschillende vaak complexe fysische processen die bijdragen tot het totale effect van de vegetatie op de lokale luchtkwaliteit. De gebruikte modellen hebben het voordeel dat zij een totaalbeeld geven zowel in de ruimte als gedeeltelijk ook in de tijd daar waar de metingen beperkt blijven tot een beperkt aantal lokale meetpunten.

De modellen hebben ook het voordeel dat de effecten van verschillende lokale parameters onafhankelijk getest kunnen worden. Zo kan men in het model op relatief eenvoudige manier bijvoorbeeld het effect van de geometrie, positie en samenstelling van de vegetatie op de lokale luchtkwaliteit aftoetsen. Ook de meteorologische condities en verkeerssamenstelling kan in het model makkelijk gewijzigd worden, daar waar men bij de metingen afhankelijk is van de lokale weersomstandigheden en een vaste omgeving. Op deze manier kunnen de modellen

helpen meer inzicht te krijgen zowel kwalitatief als kwantitatief in de lokale effecten van groenbarrières.

Binnen het IPL-project vegetatie zijn door twee partners: TNO en VITO, modelanalyses uitgevoerd waarvan de resultaten zijn opgenomen in vier rapporten of deelrapporten zie [7,8,10,14], de resultaten worden samengevat in hoofdstuk 4.

3 Resultaten Metingen

3.1 Perceel I: Metingen aan bestaande vegetatie op locatie Vaassen

3.1.1 Vegetatie

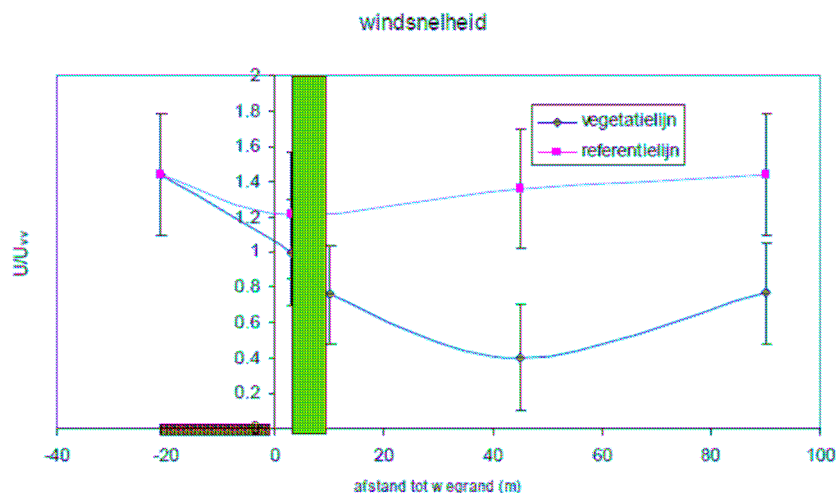
In de pilotstudie [5] zijn geen metingen gedaan naar de porositeit en vitaliteit van de vegetatie op het moment van meten. In de vervolgstudie [9,10] is dit wel gedaan. Aan de hand van optische metingen is de porositeit op 19% geschat in de zomer, maar de vegetatie is niet homogeen verdeeld en soms open van 1 meter hoogte tot aan de grond. Dit was ook te zien aan de LAD-metingen (LAD = Leaf Area Density = verhouding bladoppervlak per eenheid bodemoppervlak) met in de kroon $0,6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ en beduidend lager in de onderste helft. In de winter na de bladval is de LAD maximaal $0,09 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ in de kroon. De geleidbaarheid van de huidmondjes van de es en eiken zijn $3\text{-}5 \text{ mm sec}^{-1}$ wat volgens de literatuur normaal is. Hieruit blijkt dat de huidmondjes normaal functioneerden en ze geen vochttekort hadden. Voldoende watervoorraad blijkt ook uit de pF-curve die is gemaakt.

3.1.2 Wind

De windsnelheidsmetingen laten in beide studies [5,10] lage gemiddelde windsnelheden zien van ongeveer 2 m s^{-1} . In de pilotstudie is een afname van de windsnelheid voor de vegetatie van 18%, veroorzaakt door stuwings. Direct achter de vegetatie is een afname van 25% waarneembaar; het minimum wordt op ongeveer 35m gevonden, waar de windsnelheid 60-70% lager is dan de achtergrondsituatie. Op 90m van de weg is de windsnelheid nog niet op het achtergrondniveau (zie figuur 8 en 9). Deze zelfde situatie vindt ook plaats in de vervolgstudie in zomer- en winterperiode (zie figuur 10). De minimale windsnelheid is in de zomer ook op ongeveer 40m gevonden met eenzelfde gemeten afname. In de winter zijn de afnames iets minder groot, namelijk tot 30%, maar er is nog altijd sprake van een afname over de gehele afstand achter de vegetatie ten opzichte van de referentielocaties.

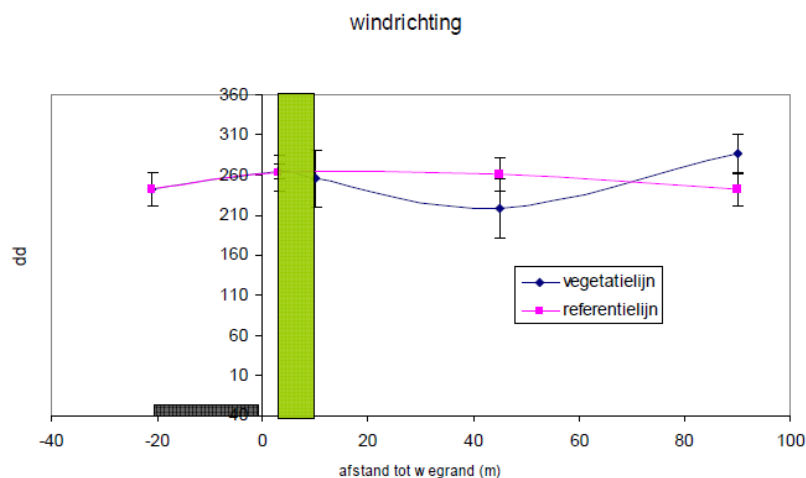
Figuur 8

Windsnelheidsgradiënt
gemeten in pilotstudie
Vaassen (Bron: [5])



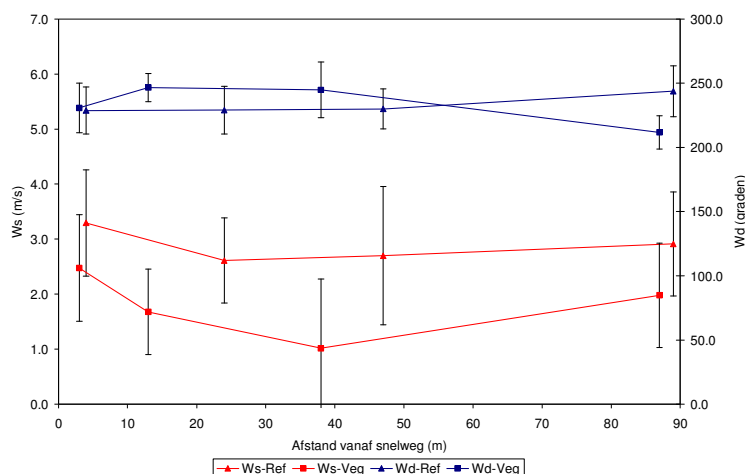
Figuur 9

Windrichtinggradiënt
gemeten in pilotstudie
Vaassen (Bron: [5])



Figuur 10

Windsnelheid- en
windrichtinggradiënt
gemeten in zomerfase
eindstudie Vaassen (Bron:
[10])

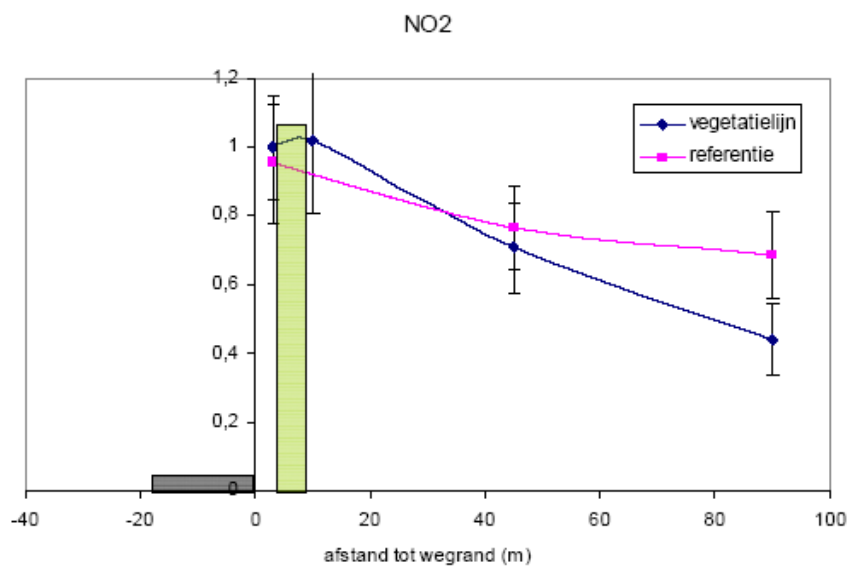


3.1.3

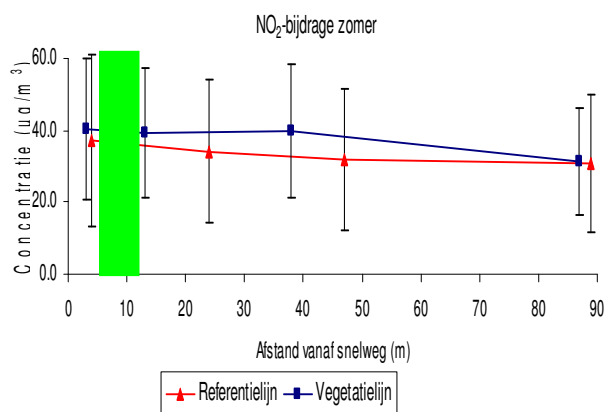
NO_x

Direct achter de vegetatie worden hogere concentraties gemeten in vergelijking met de ongestoorde situatie. De toename is maximaal 10% net achter de vegetatie. Op grotere afstand zijn lagere concentraties van NO en NO_2 gemeten vanaf ongeveer 30m. In de pilotstudie is het verschil voor NO_2 op 90m significant met 20% reductie (zie figuur 11). In de vervolgstudie zijn er tot 40m bijna geen verschillen voor NO_x (zie figuur 12) Vanaf 40m nemen de verschillen van de wegbijdragen toe met de afstand van de weg, hetgeen duidt op een verdunningseffect. Op 90m is het effect van vegetatie op NO_x -concentraties ongeveer 30% (niet significant). Voor NO_2 is pas effect zichtbaar vanaf ongeveer 90m (zie figuur 13). In de wintersituatie is het omgekeerde het geval (zie figuur 14). Hier is geen positieve bijdrage van de vegetatie te zien, maar een negatieve bijdrage tot 70% op 90m voor NO_x en 40% voor NO_2 . Wel is het zo dat de metingen een grote standaarddeviatie vertonen en dat daardoor de verschillen niet significant zijn. Voor alle metingen geldt dat er een correctie is toegepast voor de systematische verschillen van de meetinstrumenten waardoor in deze studies de onzekerheid in de concentratiegegevens vrij groot is.

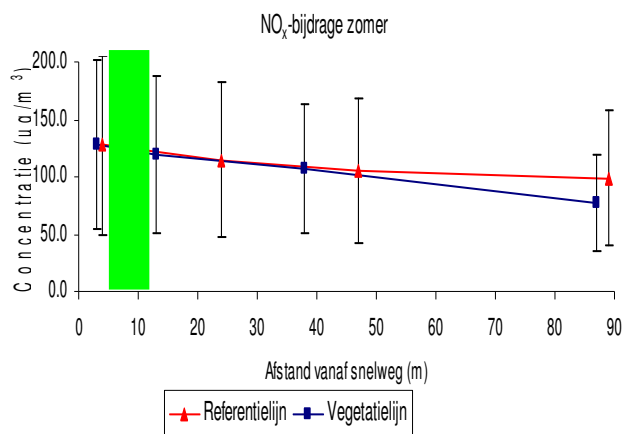
Figuur 11
Concentratiegradient NO₂ in
van pilotstudie Vaassen
Bron: [5]



Figuur 12
Concentratiegradient NO₂ in
de zomercampagne van
vervolgstudie Vaassen
Bron: [10]

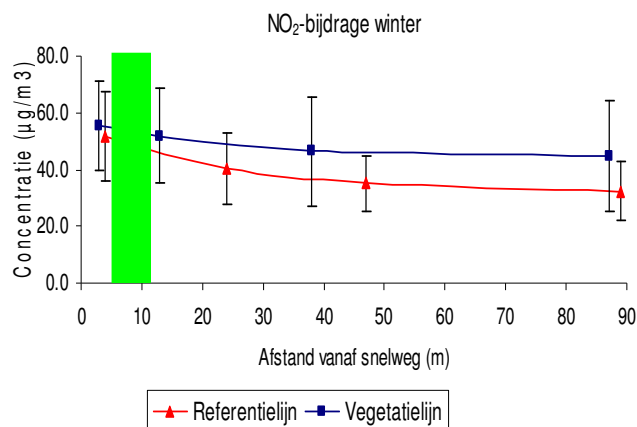


Figuur 13
Wegbijdragen NO_x in de
zomercampagne van
vervolgstudie Vaassen
Bron: [10]



Figuur 14

Wegbijdragen NO_x in de wintercampagne van vervolgstudie Vaassen (Bron: [10])



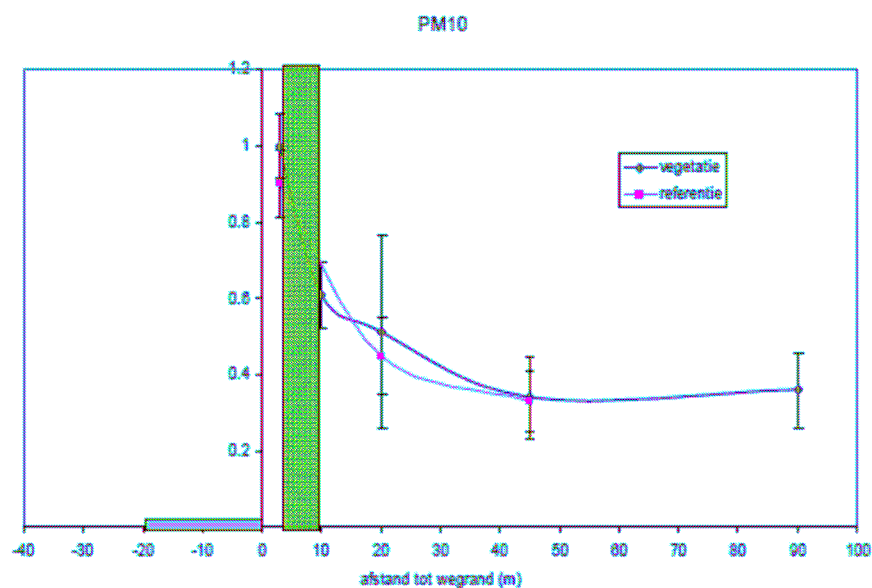
3.1.4

Fijn stof

Resultaten van de fijn stof metingen vanuit de pilotstudie laten een verschil zien tussen voor en achter de vegetatie voor PM₁₀ (zie figuur 15), PM_{2.5} en PM₁. Dit is maximaal voor PM₁₀ en hiervoor is ongeveer 10% reductie gevonden achter de vegetatie. Dit verschil neemt af met afnemende deeltjesgrootte. Daarnaast is een schatting gemaakt voor adsorptie en depositie van PM₁₀ en PM_{2.5} door te normeren naar PM₁ (zie figuur 16). De resultaten hiervan leiden tot een schatting van een maximale afname van 20% voor PM₁₀ en 17% voor PM_{2.5} direct na de vegetatie ten opzichte van PM₁. De onzekerheid in deze getallen is groot omdat deze gebaseerd zijn op slechts enkele metingen met een vrij grote meetonzekerheid. In de absolute concentraties is het effect zeer gering. Deze resultaten geven alleen aan dat de grotere deeltjes (PM₁₀, PM_{2.5}) beter afgevangen worden dan de kleine deeltjes (PM₁). Op regionale schaal geaccumuleerd voor alle vegetatie leiden deze opnames uiteindelijk mogelijk tot iets lagere concentraties, maar dichtbij de vegetatie leiden andere invloeden tot grotere effecten.

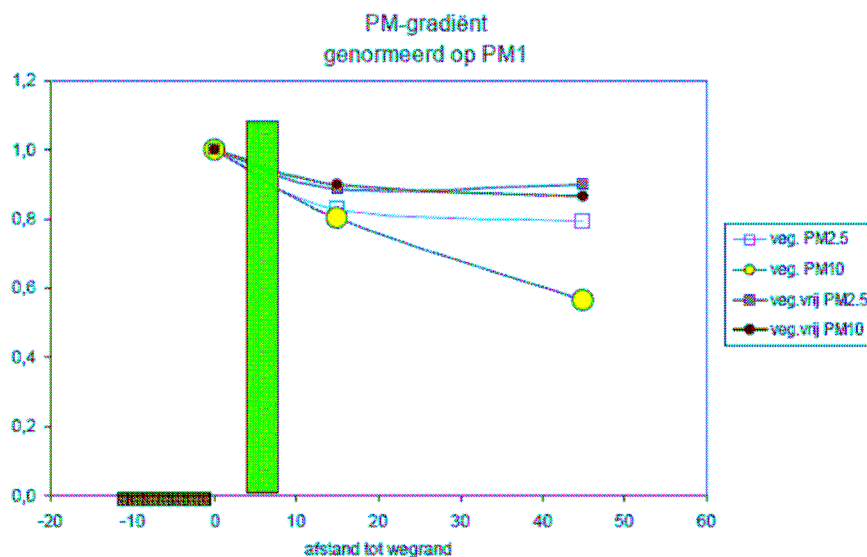
Figuur 15

Concentratieverloop PM₁₀ in de pilotstudie Vaassen (Bron: [5])



Figuur 16

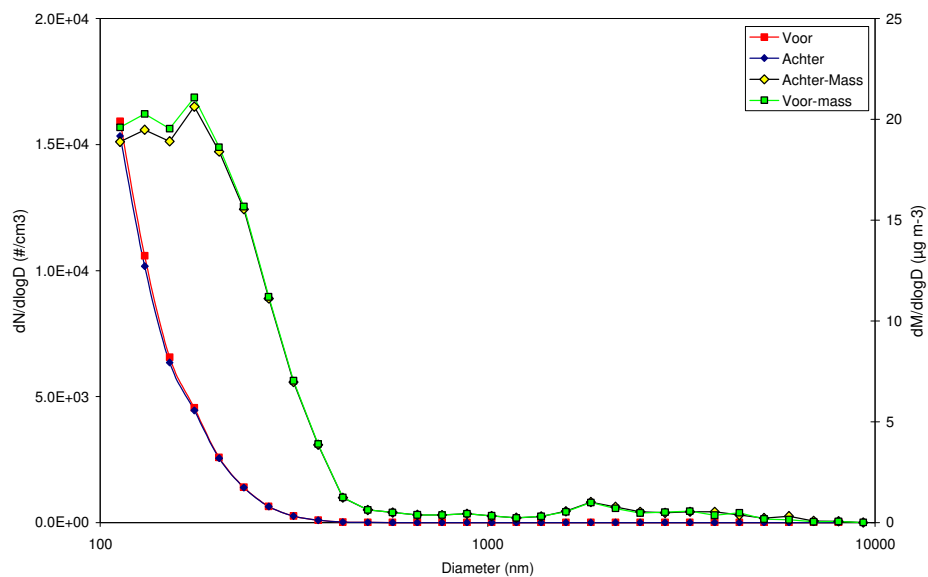
Gradiënten van fijn stof in de grootte PM_{2.5} en PM₁₀ genormeerd naar PM₁ als functie van afstand van de weg voor de situatie met en zonder vegetatie.
(Bron: [5])



In de vervolgstudie met de langere meetreeks is in zomer en winter voor de kleinere deeltjes ($<PM_1$) en het aantal deeltjes weinig effect aangetoond voor en achter de vegetatie (zie figuur 17). Metingen van PM₁₀ geven een reductie van ongeveer 8% achter de vegetatie op 90m afstand van de weg. Dit is overigens niet significant met een 95%-betrouwbaarheidsinterval van 14% (zie figuur 18). Op kortere afstand van de weg, direct achter de vegetatie, waren geen betrouwbare data aanwezig om uitspraken te kunnen doen.

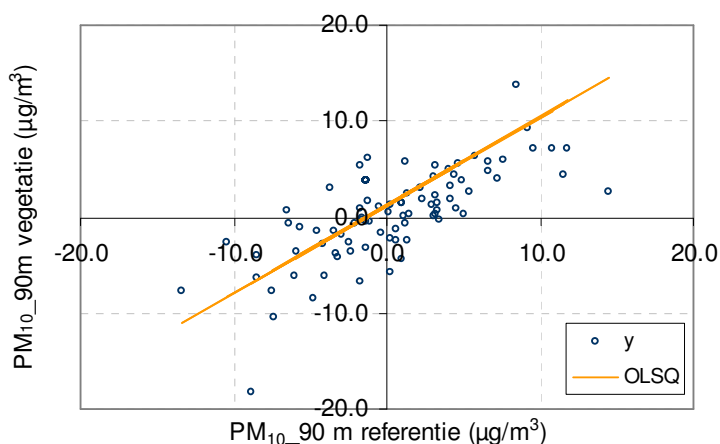
Figuur 17

Deeltjesgrootteverdeling op logaritmische schaal in aantallen(linkeras) en in massa(rechteras). Metingen zijn uitgevoerd tussen 18 en 21 juni 2008
(Bron: [10])



Figuur 18

Bijdrage van de vegetatie op de PM₁₀-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%
OLSQ=orthogonal least square regression (Bron: [10])



3.2

Perceel II: Metingen aangeplante vegetatie op locatie Valburg

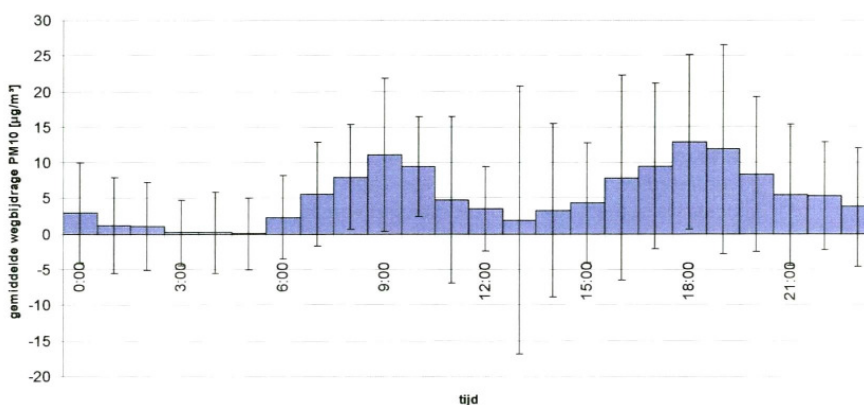
Op het moment van opstellen van voorliggend rapport bestaat er nog geen gezamenlijke en volledige consensus van alle bij het project betrokkenen over de resultaten. Het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit (IPL) heeft daarom niet de volledige inhoud van dit rapport geaccepteerd. Met name de kwaliteit van de metingen (dataset en de kalibratie van de metingen) is volgens deskundigen van Rijkswaterstaat tot nu toe onvoldoende aangetoond. De Universiteit van Wageningen dient nog inzicht te geven in de kwaliteit van de metingen. De resultaten van deze metingen worden daarom hier niet beschreven. De bijdragen van VITO en KEMA zijn wel van voldoende kwaliteit maar zijn echter ook gebaseerd op de metingen. Onderstaande resultaten van M+P zijn wel gevalideerd.

M+P raadgevende ingenieurs heeft aanvullende fijn stof metingen uitgevoerd op perceel II [13]. Deze metingen zijn uitgevoerd met behulp van TEOM apparatuur gedurende de periode september-december 2008.

De maximaal gemeten bijdrage van de weg aan de PM10 concentraties is ongeveer 10 µg/m³ (zie figuur 19). In de figuur is tevens het 95% betrouwbaarheidsinterval van de verschilmeting weergegeven. Duidelijk is dat voor de gekozen middelingstijd de verschilmeting met de TEOM apparatuur een meetonzekerheid oplevert in de orde van grootte van de te meten maximale concentratiebijdrage.

Figuur 19

Gemeten bijdrage van het verkeer aan PM10 concentraties gedurende enkele dagen uit de M+P meetreeks voor perceel II (Bron: [13])

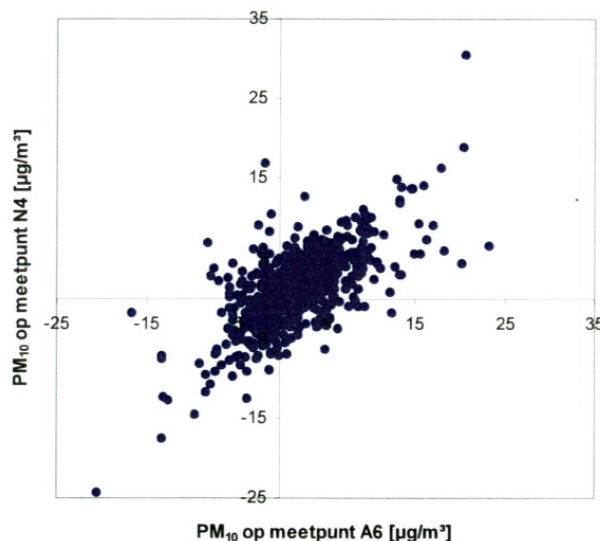


De gebruikte TEOMS zijn voor en na de metingen uitgebreid getest en gecalibreerd, daarbij werden geen significante systematische afwijkingen tussen de apparaten geconstateerd, met uitzondering van een lek bij de eindtest, het is niet zeker of dit lek ook de metingen heeft beïnvloed.

Resultaat van de vergelijkingen tussen TEOM metingen op de plek met en zonder de vegetatie (alleen dennen) is dat de totale PM_{10} concentraties op die plekken niet statistisch significant verschillend zijn. Na berekenen van de wegbijdragen door aftrekken van de concentraties op het achtergrondpunt wordt gevonden dat de wegbijdrage aan PM_{10} op het punt achter de vegetatie 10% +/- 8% lager zijn dan op het punt zonder vegetatie (naaldbomen) (zie figuur 20). Het resultaat is maar net significant en blijkt sterk afhankelijk van de gebruikte regressietechniek. Wel kan hierbij aangetekend worden dat de eventuele invloed van het talud op de aan- en afstroming op perceel II niet gescheiden kan worden van het eventuele effect van de vegetatie.

Figuur 20

Scatter diagram van de gemeten wegbijdragen PM_{10} op de locatie met en zonder vegetatieinvloed op perceel II, de vegetatie bestaat hier uit naaldbomen (Bron: [13])



3.3

Vegetatie als toepassing in geluidsschermen

In [16, 17] worden de resultaten gepresenteerd van een langdurige proef met 9 verschillende geluidsschermen. Daarbij is de invloed van de schermen op de luchtkwaliteit langs snelwegen onderzocht. Er zijn standaard geluidsschermen vergeleken met schermen die bedoeld waren om de luchtkwaliteit achter het scherm verder te verbeteren dan met het standaardscherm. Een van deze alternatieve ontwerpen is een volledig uit vegetatie bestaand scherm. Gebleken is dat alle alternatieve ontwerpen, inclusief het ontwerp met vegetatie, minder effectief zijn dan het standaard referentiescherm van 4 meter hoogte, al is de onzekerheid in de resultaten zo groot dat het verschil niet statistisch significant is.

4 Resultaten Modelleren

Door twee onderzoeksgroepen, VITO en TNO, zijn modelberekeningen gedaan voor beide meetlocaties. Beide gebruiken hiervoor een 'Computational Fluid Dynamics' (CFD)-gebaseerd luchtkwaliteitmodel. TNO gebruikt hiervoor Fluidyn PANAIR, VITO gebruikt hiervoor Envi-met. Beide modellen zijn wat de basis betreft vergelijkbaar, maar kennen toch een aantal verschillen bij de benadering van een aantal fysische processen. In onderstaande paragraaf zullen de modellen kort vergeleken worden. Ook de benadering van de verschillende onderzoekers en resultaten worden hier geresumeerd.

4.1 De modellen: PANAIR en Envi-met

Fluidyn PANAIR is een commercieel pakket ontwikkeld door Transoft International, welke onder licentie gebruikt kan worden. Envi-met is van origine een academisch model ontwikkeld door Professor M. Bruse, Universiteit Mainz, als microklimaatmodel. Later is in samenwerking met VITO het model uitgebreid met een luchtkwaliteitsmodule. De verdere ontwikkeling van het model is een samenwerking tussen VITO en Universiteit Mainz, waarbij VITO zich concentreert op de verdere ontwikkeling van de luchtkwaliteitsmodules en Universiteit Mainz op de microklimaat modellen. Een beperkte versie van het model, zonder de aanpassingen voor berekeningen aan groen en NO_x chemie, is vrij beschikbaar.

Het basisprincipe van alle CFD-pakketten is de numerieke benadering van de zogenaamde Navier-Stokes vergelijkingen. Deze beschrijven het behoud van massa, impuls en energie. In dit deel van de code is PANAIR iets flexibeler dan Envi-met, in die zin dat de gebruiker bij PANAIR de keuze heeft tussen een aantal numerieke solvers en turbulentie modellen. Ook heeft de gebruiker meer flexibiliteit in de keuze van de cellen of het mesh. Dit maakt dat PANAIR op een bredere schaal inzetbaar is, gaande van micro-schaal tot beperkt regionaal model. Envi-met heeft deze keuze niet en is enkel inzetbaar als microschaal model voor een domein gaande tot enkele honderden meters met een typische resolutie van enkele decimeters tot 10 meter.

Voor beide modellen geldt dat de limieten van het domein bepaald worden door de beschikbare reken capaciteit en CPU-tijd. Recentelijk is ook het Envi-met model uitgebreid met een optie om het grid lokaal te verfijnen, hetgeen berekeningen voor een groter domein toelaat zonder verlies aan nauwkeurigheid. Deze optie was echter nog niet beschikbaar bij het uitvoeren van de analyses binnen het IPL-project. Envi-met heeft slechts één turbulentie-model: een zogeheten twee-parameter K- ϵ model waarbij K de turbulente energie is en ϵ de dissipatie van de energie. Hetzelfde model werd door TNO geselecteerd binnen PANAIR voor alle modelanalyses.

Envi-met onderscheidt zich van andere CFD-modellen in de uitgebreide koppeling van een aantal andere fysische modellen die in meer of mindere mate een effect kunnen hebben op de lokale luchtkwaliteit zoals het bodemmodel, dat samen met het stralingsmodel effect heeft op de atmosferische stabiliteit en temperatuur. Daarom zijn berekeningen mogelijk voor andere stabiliteitsklassen dan neutrale condities zoals standaard alleen mogelijk in andere CFD-luchtkwaliteitanalyses en windtunnel metingen.

Zowel PANAIR als Envi-met beschikken over een vegetatiemodule om het effect van vegetatie in rekening te brengen. In Envi-met is dit een uitgebreide module die zowel gekoppeld is met de Navier-Stokes vergelijking – extra verliestermen in de impulsvergelijkingen, extra verlies en brontermen in het K-ε model, als ook aan het temperatuurmodel en luchtvochtigheid, schaduw en reflectie in het stralingsmodel en belangrijk voor deze studie: depositie in de dispersiemodellen voor de verschillende gascomponenten en fijn stof. In Envi-met wordt de depositiesnelheid berekend op basis van de plantfysiologische eigenschappen alsook de karakteristieken van de verschillende gascomponenten en deeltjesgrootte van het fijn stof. Zowel in Envi-met als in Panair wordt het effect van vegetatie op de stroming gemodelleerd als een poreus element dat weerstand biedt afhankelijk van de bladerdichtheid. Hoe deze elementen gekoppeld zijn met de turbulentie modellen is niet duidelijk. Ook in PANAIR is het mogelijk depositie in rekening te brengen. De depositiesnelheid wordt echter niet berekend, maar moet door de gebruiker als parameter opgegeven worden. Voor de analyses binnen het IPL-project heeft TNO voor de depositiesnelheid een aantal waardes overgenomen uit de door VITO gerapporteerde Envi-met berekeningen.

Tijdens de duurtijd van het IPL-project heeft VITO het Envi-met model uitgebreid met een chemiemodule die de reacties van ozon met NO en NO₂ in rekening brengt. Uniek aan deze uitbreiding is dat de drie componenten O₃, NO en NO₂ simultaan berekend worden waarbij de dispersiemodellen met elkaar gekoppeld zijn door niet-lineaire chemische reactietermen. Op deze manier worden de chemische reacties continu berekend. Ook PANAIR biedt de gebruiker de mogelijkheid om eenvoudige chemische omzettingen in te voeren. Deze optie is echter vanwege de slechte prestaties van het model bij inschakelen van deze optie niet gebruikt bij de modelanalyses binnen het IPL-project.

Het effect van de verkeersgeïnduceerde turbulente wordt in beide modellen slechts in beperkte mate gemodelleerd. In PANAIR is gepoogd om het ontbreken van een model voor de verkeersgerelateerde turbulentie te ondervangen door het plaatsen van een groot aantal puntbronnen op de rijbaan met een verticale impuls. In Envi-met is getracht de de initiële spreiding door de turbulentie van het verkeer te modelleren door de lijnbronnen hoger te leggen dan de gemiddelde uitlaathoogte en te spreiden over de volledige breedte van de rijbaan. Een initiële verticale spreiding van de bronnen was op dat ogenblik nog niet mogelijk binnen Envi-met.

Tabel 1 geeft een overzicht van bovenvermelde verschilpunten en gelijkenissen tussen de twee modellen. Voor een uitgebreide beschrijving van de modellen wordt verwezen naar de verschillende rapporten binnen het IPL-project ([7][8][14]).

Tabel 1
Vergelijking van de
gebruikte modellen

	PANAIR	Envi-met
Ontwikkelaar	Transoft International (licentie)	Universiteit Mainz – VITO (beperkte versie vrij beschikbaar)
Schaal	Microschaal tot beperkt regionaal	Microschaal
Grid	Variabel	Gestructureerd, typische resolutie 0.5 – 10m
CFD-model	Reynolds Averaged Navier-Stokes	Reynolds Averaged Navier-Stokes
Turbulentiemodel	K- ϵ (andere modellen beschikbaar)	K- ϵ
Numerieke solver	Keuze door gebruiker	ADI
Vegetatiemodule	Beperkt, depositiesnelheid als input parameter	Uitgebreid, depositiesnelheid berekend op basis van plantfysiologische parameters, meteo en pollutant
Chemiemodel	Niet gebruikt	Ozon chemie, simultaan
Meteorologie	Neutrale atmosfeer	Stabiliteit berekend op basis van bodem en stralingsmodel
Verkeersgeïnduceerde turbulentie	Geen model, gesimuleerd door verticale injectie van puntbronnen	Geen model, gesimuleerd door lijnbronnen hop grotere hoogte en horizontale spreiding over ganse baanbreedte

4.2 Modelresultaten

4.2.1 Voorstudie ten behoeve van het uitvoering van een pilot project langs rijkswegen - Update en gevoeligheidsanalyse van de vegetatiemodule in het Envi-met model.
VITO heeft een verkennende studie uitgevoerd met het Envi-met model [7] waarbij een eerste aanzet werd gegeven tot het afschatten van de effecten van vegetatie op de lokale luchtkwaliteit, zowel kwalitatief als kwantitatief. In een gevoeligheidsanalyse worden verschillende configuraties van groenschermen doorgerekend. In deze eerste modelanalyse wordt de chemische reactie van ozon met stikstofoxiden nog niet in rekening gebracht.

Het rapport geeft een uitgebreide beschrijving van de Envi-met vegetatie module en beschrijft in detail de rol en gevoeligheid van de verschillende fysische processen. Het rapport toont aan dat het netto-effect van de vegetatie op de lokale luchtkwaliteit bepaald wordt door een complexe samenwerking van verschillende fysische processen. Het verslag visualiseert een eerste maal het mogelijke globale effect van vegetatie op de lokale luchtkwaliteit. Het model toont aan dat zowel vlak voor als vlak na de vegetatie men een verhoging van de concentraties NO_x en fijn stof kan verwachten. Pas op enige afstand achter de vegetatie, hier typisch rond de 30 meter, kan men een lichte verlaging van de concentratie waarnemen ten gevolge van de aanwezigheid van de vegetatie. De mate waarin er een verhoging en verlaging is, en de afstand vanwaar men een verlaging kan waarnemen zijn afhankelijk van de positie, geometrie en dichtheid van de vegetatie. Algemeen kan men stellen dat de effecten, zowel positief als negatief, sterker worden voor meer dichte, en voor hogere vegetatie kort bij de weg. Voor alle berekeningen is een

neutrale atmosfeer verondersteld. Het effect van de meteorologie is binnen dit onderzoek niet bestudeerd.

De door Envi-met berekende depositiesnelheden zijn vergeleken met waarden bekend uit de literatuur. Het rechtstreekse effect van depositie op de lokale luchtkwaliteit wordt in het verslag als zeer laag beschreven. Enkel bij artificiële opschaling van de depositiesnelheden is een filteringeffect waarneembaar. In het rapport wordt de depositie op de vegetatie vergeleken met de lokale verkeersemisies voor NO_2 en PM_{10} . Met een berekende depositiesnelheid voor NO_2 tussen de 4 en 5 mm/s wordt een gemiddelde afvangst van minder dan 1% voorspeld. Het model berekent voor naalddhout een depositiesnelheid die hoger dan voor de meeste configuraties loofhout. Voor de afvangst van de grove fracties van fijn stof is de afvangst door loofhout minimaal: enkele tienden van een procent. Voor naalddhout wordt een gemiddelde depositiesnelheid van 1.5 cm per seconde berekend, hetgeen volgens het model leidt tot een afvangst van 1.5% van de verkeersbijdrage aan fijn stof.

4.2.2 *Modelanalyse van de IPL meetcampagne langs de A50 te Vaassen ter bepaling van het effect van vegetatie op luchtkwaliteit langs snelwegen – Envi-met modellering van de ECN 2006 meetcampagne te Vaassen.*

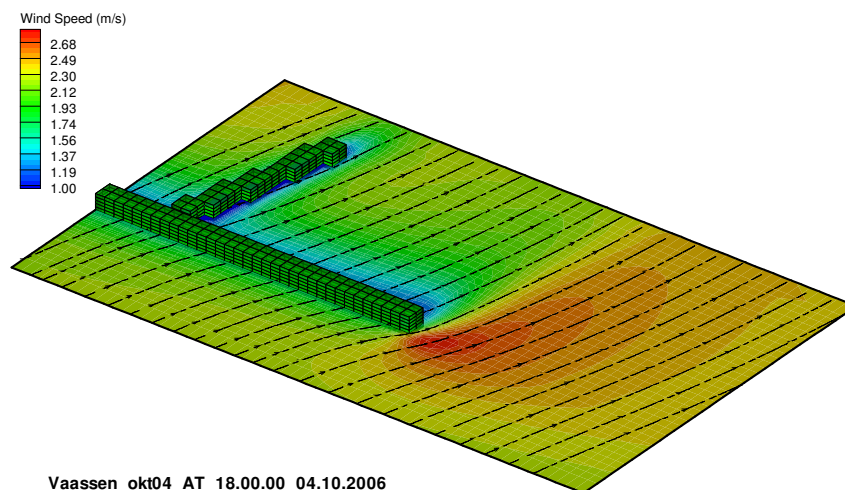
In dit rapport van de modelanalyse [8] worden berekeningen met het Envi-met model vergeleken met de resultaten van de eerste ECN metingen langs de A50 te Vaassen, zomer 2006, waarvan de resultaten eveneens geresumeerd zijn in dit verslag. Er zijn data beschikbaar van vijf dagen voor stikstofoxiden. Voor fijn stof is slechts een beperkte dataset beschikbaar.

Voor deze studie is het model uitgebreid met een chemimodule voor ozon, NO en NO_2 . Ook het fijn stof model werd verfijnd door de PM_{10} op te splitsen in twee fracties: $\text{PM}_{2.5}$ en $\text{PM}_{\text{coarse}}$ voor deeltjes met een diameter tussen de 2.5 en 10 μm . Voor beide fracties worden individuele emissies, depositiesnelheden en sedimentatiesnelheden berekend. Er is geen uitwisseling van deeltjes tussen de twee klassen.

Figuur 21 tot en met figuur 23 tonen enkele typische Envi-met resultaten voor het windveld en de concentraties NO_2 en $\text{PM}_{2.5}$ voor de locatie van de meetproef langs de A50, Vaassen. De modelresultaten zijn getoetst aan de beschikbare meetgegevens.

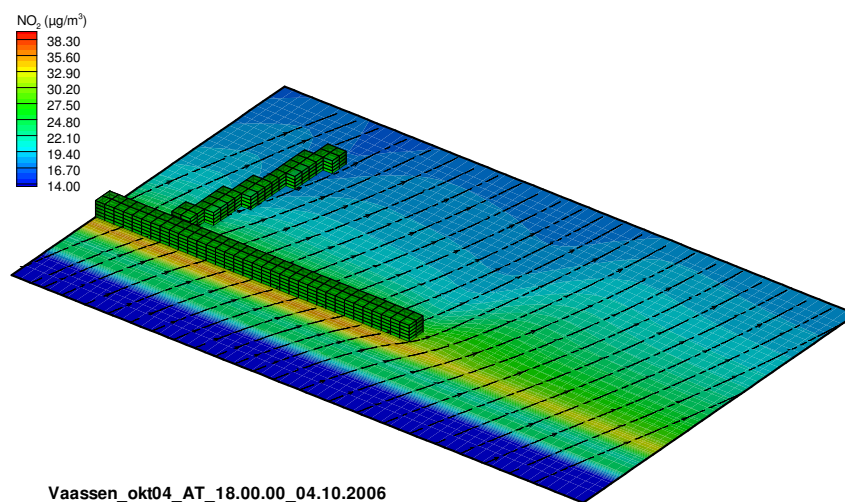
Figuur 21

Modelberekening Envi-met:
Windveld. Bron: [14]



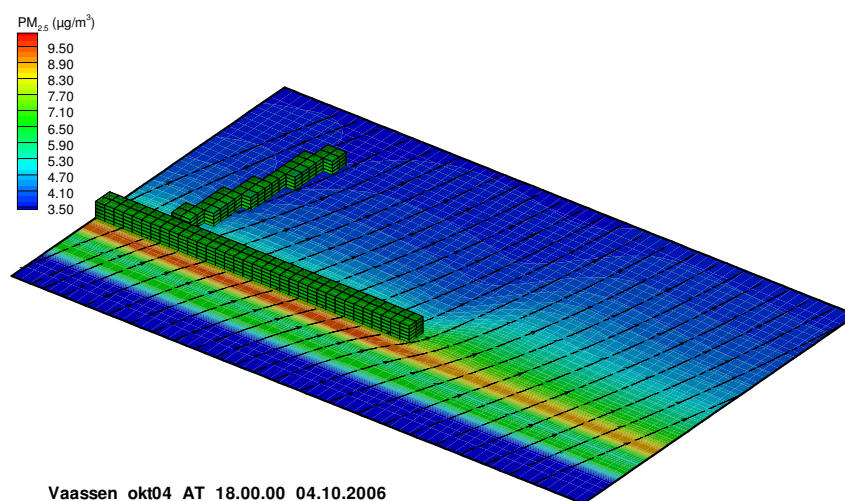
Figuur 22

Modelberekening Envi-met:
NO₂ concentraties. Bron:
[14]



Figuur 23

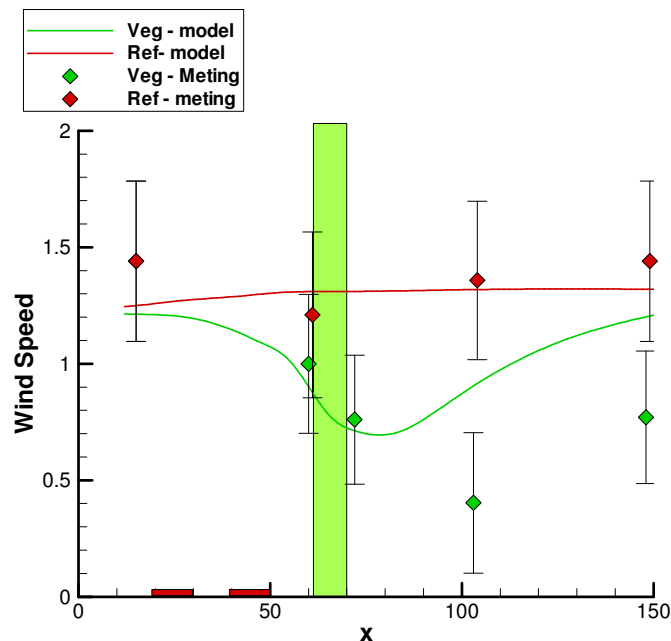
Modelberekening Envi-met:
PM_{2.5} concentraties. Bron:
[14]



Figuur 24 toont de vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde gemiddelde windsnelheden na normering met het meetpunt vlak voor de vegetatie. De figuur toont aan dat de reductie in windsnelheid vlak voor en vlak na de vegetatie goed gemodelleerd wordt. Wel reikt de invloed van de vegetatie op het gemodelleerde windveld minder ver dan gemeten. In het model wordt een variabele *leaf area density* (LAD) gebruikt van rond de $1.4\text{m}^2/\text{m}^3$ voor de kruin en 0.4 voor de ondergroei. Bij gebrek aan metingen werd de LAD bepaald aan de hand van literatuur en door de gemodelleerde windprofielen vlak achter de vegetatie te vergelijken met de beschikbare meetgegevens.

Figuur 24

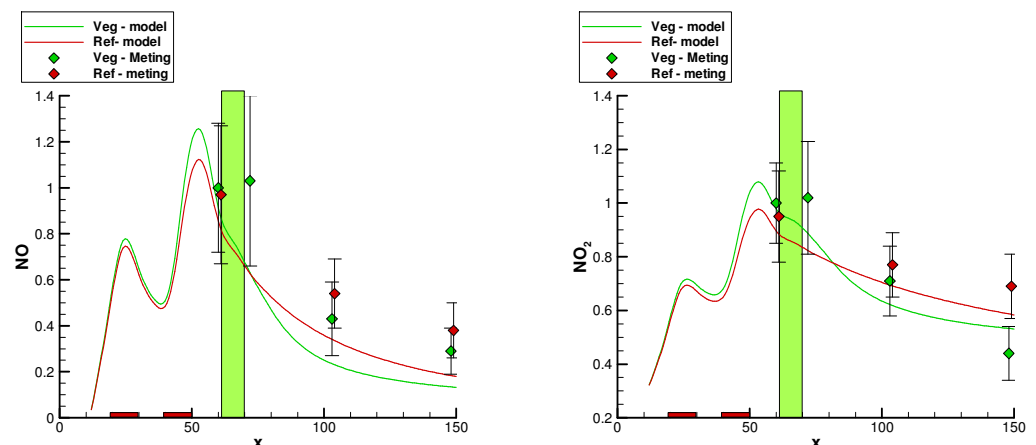
Vergelijking ECN Metingen en Envi-met modellering gemiddelde windsnelheid na normering. Bron: [14]



Figuur 25 toont de genormeerde (alle concentraties worden gedeeld door de meting op het punt vlak voor de vegetatie) NO en NO₂ concentraties voor de metingen en modellering met Envi-met. Het effect van de ozonchemie wordt hier duidelijk: Door de lagere windsnelheid en extra inmenging van verse ozon heeft de verkeersgerelateerde NO meer tijd om te reageren met ozon en zo extra NO₂ te produceren.

Figuur 25

Vergelijking ECN Metingen en Envi-met modellering gemiddelde NO en NO₂ concentraties na normering. Bron: [14]

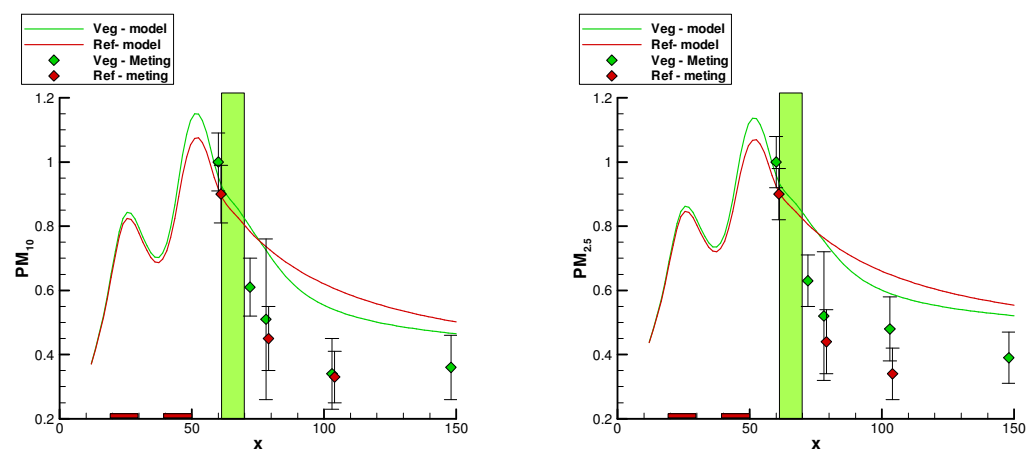


Alhoewel de genormeerde concentratieprofielen voor NO_2 redelijk goed overeenkomen, werden de absolute concentraties NO_2 over het algemeen onderschat. De onderzoekers wijten deze oorzaak in hoofdzaak aan een mogelijke onderschatting van de real-time NO_x -emissies in vergelijking met de gerapporteerde emissies voor de verschillende EURO-klassen, alsook een verouderde NO/NO_2 verhouding van de directe emissies. Naast de mogelijke afwijkingen in emissies wordt ook een afwijking in geschatte achtergrondconcentraties ozon vermeld als mogelijke oorzaak van de verschillen. Echter, nadere analyse toont aan dat dit laatste effect hier minimaal is. Als derde oorzaak wordt het ontbreken van verkeersgeïnduceerde turbulentie vermeld, welke een extra ozon inmenging ter hoogte van de emissies tot gevolg zou kunnen hebben, leidend tot een verhoogde chemische omzetting van NO naar NO_2 . Het is echter niet duidelijk hoe sterk de invloed hiervan zou kunnen zijn op de concentraties verder weg van de bron.

Voor PM wijken de modelresultaten in zekere mate af van de waarnemingen zoals waarneembaar in figuur 26. De concentraties vlak voor de vegetatie worden door het model goed gemodelleerd. In het model nemen de concentraties echter minder snel af dan in de metingen. Hierbij dient wel gemeld te worden dat wat betreft metingen voor PM slechts een minimale hoeveelheid data beschikbaar was. Het zou voorbarig zijn op basis van deze beperkte dataset conclusies te trekken ten aanzien van het model.

Figuur 26

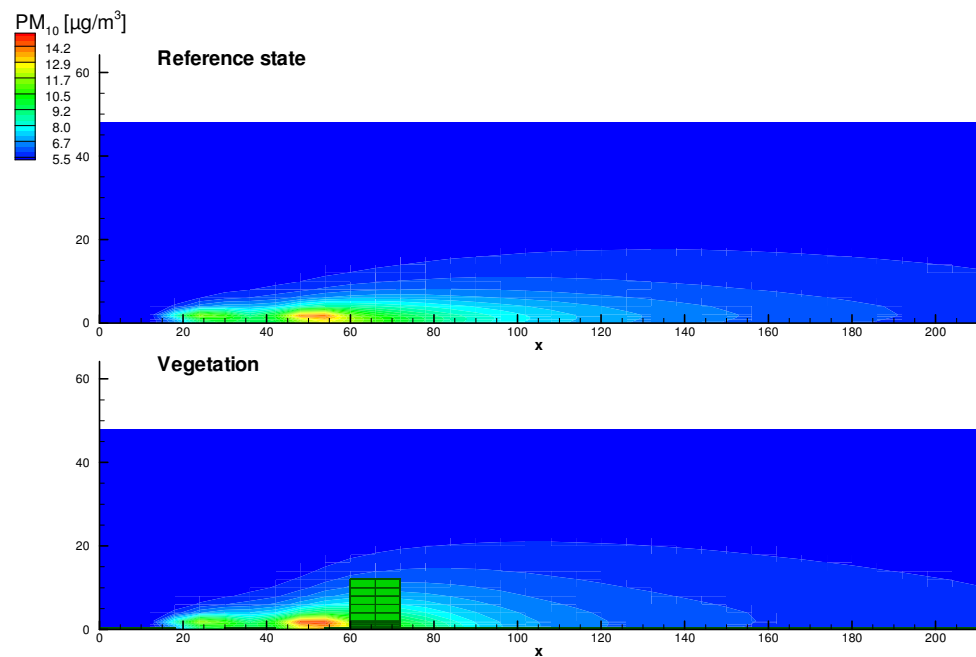
Vergelijking ECN Metingen en Envi-met modellering gemiddelde $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} concentraties na normering (concentratie pal voor vegetatie=1) Bron: [14]



In het rapport worden verder de verschillende processen die een effect hebben op de lokale luchtkwaliteit geanalyseerd door het relatieve verschil in concentraties in een vlak loodrecht op de weg als een 2D contourplot te visualiseren. Ter illustratie: Figuur 27 geeft de verticale PM_{10} -concentratie verdeling weer in een vlak loodrecht op de weg, met en zonder vegetatie. De baanvakken van de weg bevinden zich in de figuur tussen 20 en 30 meter en tussen 45 en 55 meter. Figuur 28 wordt dan verkregen door het relatieve verschil te nemen van beide plots. Een positieve waarde betekent een plaatselijke verhoging van de concentraties ten gevolge van de vegetatie, een negatieve waarde een lokale verlaging. Figuur 29 en figuur 30 geven een op vergelijkbare wijze verkregen analyse voor NO en NO_2 . Merk op dat dit een cumulatief effect is van de vegetatie zowel op de achtergrond als op de lokale bijdrage van verkeer. Figuur 31 geeft het effect op het snelheidsveld weer.

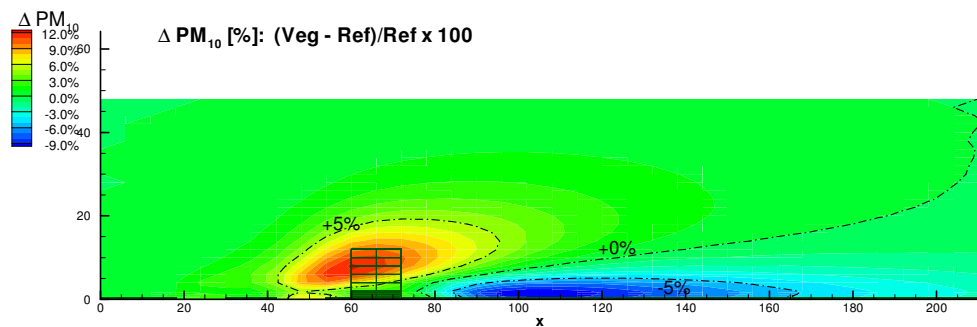
Figuur 27

Contourplot van de
gemiddelde PM_{10} -
concentraties in vertikaal
vlak loodrecht op de weg,
met en zonder vegetatie. .
Bron: [14]



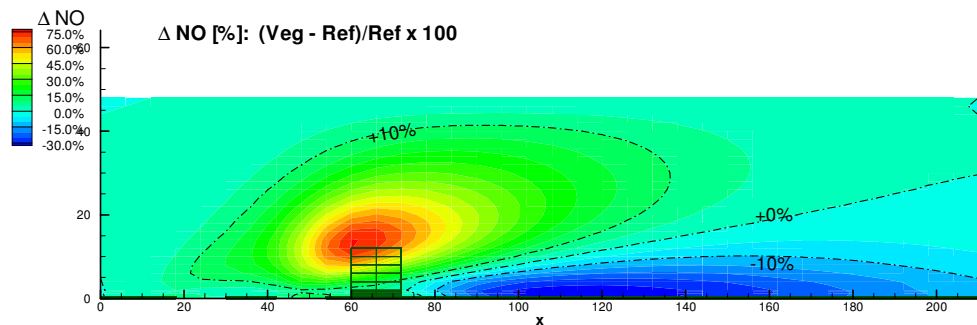
Figuur 28

Contourplot van relatieve
effect van vegetatie op de
 PM_{10} -concentraties. Bron:
[14]



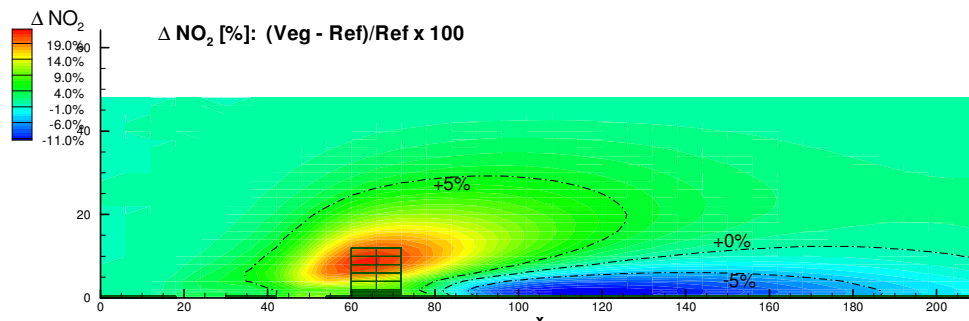
Figuur 29

Contourplot van relatieve
effect van vegetatie op de
NO-concentraties. Bron:
[14]



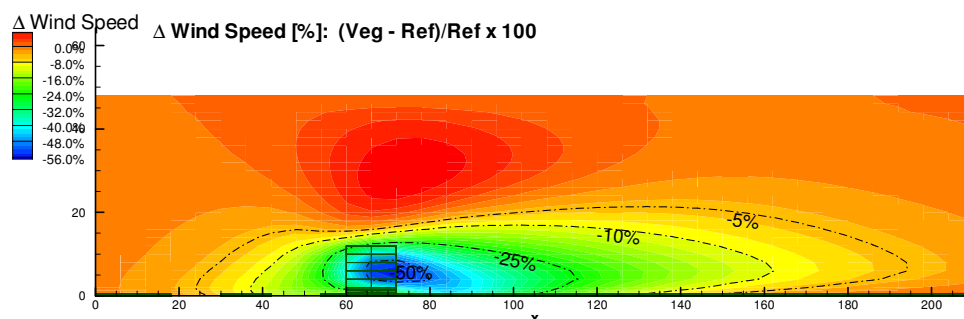
Figuur 30

Contourplot van relatieve effect van vegetatie op de NO₂-concentraties. Bron: [14]



Figuur 31

Contourplot van relatieve effect van vegetatie op het snelheidsveld. Bron: [14]



Een substantiële verhoging van de concentraties is waarneembaar vlak achter de vegetatie, met een maximale toename op een hoogte rond de tien meter. Een verklaring hiervoor is het barrière effect van de vegetatie die voor een verlaging zorgt van de windsnelheid ter hoogte van de emissies. Door het opstuwend effect en de verhoogde turbulentie achter de vegetatie kan men vanaf op grondniveau tot op ongeveer vijf meter hoogte een zone detecteren met verlaagde concentraties van 5% en meer voor PM en NO₂, en zelfs meer dan 10% voor NO.

Tenslotte vermeldt het rapport de gemiddelde depositiesnelheden zoals berekend voor deze analyse door het model. Deze zijn lager dan in de hierboven beschreven gevoeligheidsanalyse. Voor NO₂ meldt het rapport een gemiddelde depositiesnelheid van rond de 2mm/s en voor PM₁₀ slechts rond de 0.1 mm/s. Voor PM is de depositiesnelheid lager omdat in de vorige analyse slechts met één deeltjesgrootte gerekend werd. Voor NO₂ is de depositiesnelheid lager omdat voor deze analyse gerekend is met de werkelijke meteorologische condities die een effect hebben op de stomatale weerstand en dus de opname van NO₂ door de bladeren. Ondanks de lagere depositiesnelheid meldt het rapport voor NO₂ toch een significante opname tussen de 6 en 8 µg/s per meter lijnvegetatie hetgeen overeen komt met 2 à 3 procent van de lokale wegbijdrage.

4.2.3

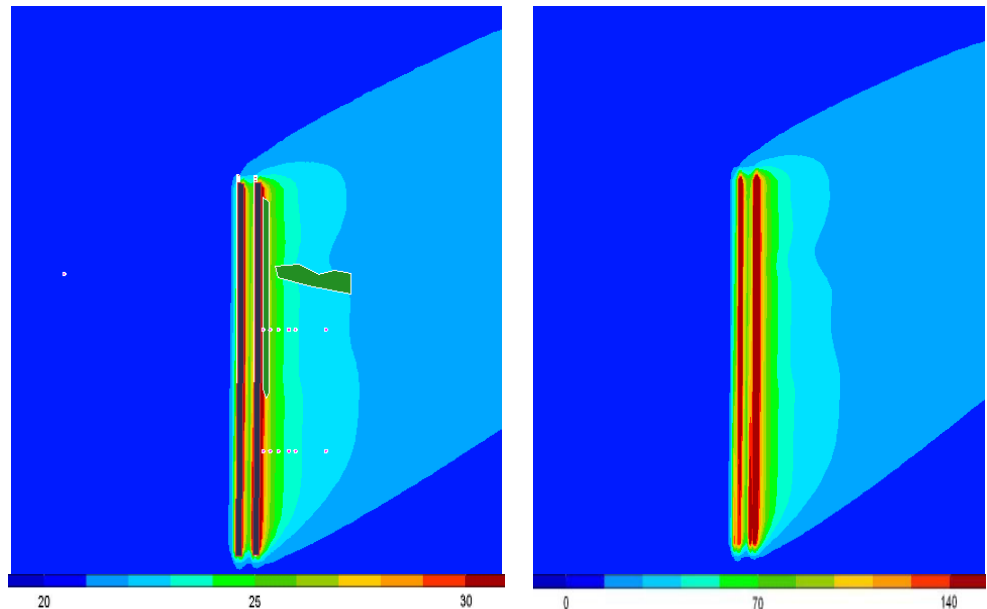
Vegetatie voor een betere Luchtkwaliteit: Perceel I – A50 Vaassen

Dit rapport beschrijft zowel de meetcampagne als de modelanalyse van *Perceel I – A50 Vaassen* [9]. De modelanalyse is uitgevoerd door TNO aan de hand van het CFD-pakket PANAIR zoals eerder beschreven in dit verslag. De onderzoekers hebben ervoor gekozen om slechts een korte periode te modelleren en te vergelijken met de metingen: 26 juni 2008 van 13 tot 16 uur. Met deze enkele en korte simulatie is niet goed te beoordelen wat de kwaliteit van PANAIR berekeningen in deze toepassing is. Voor de modelanalyse werd een windrichting

van 240° graden gebruikt en een windsnelheid van 3.5m/s op 2m hoogte. De ruwheidslengte van het terrein werd geschat op 3cm en een neutrale atmosferische grenslaag werd verondersteld.

Figuur 32 toont de typische PANAIR output voor PM₁₀ en NO_x zoals ook gepresenteerd in het verslag. In figuur 33 worden de gemodelleerde en gemeten snelheid op twee meter hoogte met elkaar vergeleken. De snelheidsverandering ten gevolge van de vegetatie is minimaal ten opzichte van de gemeten snelheden, zowel voor als achter de vegetatie. In tegenstelling tot de metingen en wat men zou verwachten is de gemodelleerde windsnelheid in de vegetatie zelfs hoger dan de referentiesnelheid. De onderzoekers wijten dit effect aan het venturi effect ten gevolge van de lagere LAD voor de ondergroei waardoor de een groter gedeelte van de aanstromende lucht lager door de vegetatie heen stroomt. De voor de modelanalyse gebruikte LAD komt overeen met de werkelijk gemeten LAD gaande van 0.2-0.3 m²/m³ voor de ondergroei tot 0.6m²/m³ voor de kruin.

Figuur 32
Modelberekeningen PANAIR:
PM₁₀- (links) en NO_x
concentraties (rechts)
(bron: [10])

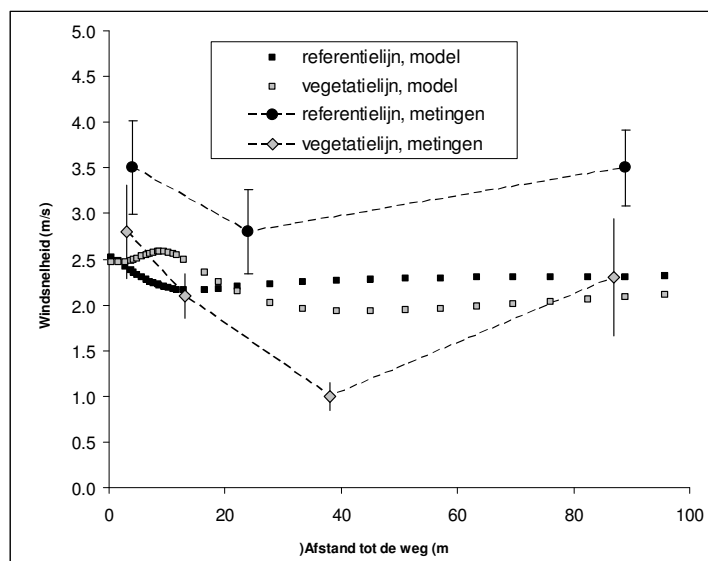


Figuur 34 toont de vergelijking tussen de gemodelleerde en gemeten PM₁₀- en NO_x-concentratiebijdrages van het verkeer op 1.5 meter hoogte. De NO_x-concentraties worden ten opzichte van de metingen duidelijk onderschat. Het is niet duidelijk of zowel NO en NO₂ onderschat worden, of slechts één van de componenten zoals dat in de vorige Envi-met analyse het geval was. Het model berekent een minimaal verschil tussen de referentie- en vegetatielijn. Voor NO_x wijkt dit duidelijk af van de metingen. Voor PM₁₀ is dit niet duidelijk gezien er maar één meetpunt is op de referentielijn, namelijk op 90m van de weg.

Voor de verschillen tussen de metingen en model vermelden de onderzoekers een aantal mogelijke oorzaken: onzekerheden in de input van het model zoals verkeersemissies, onzekerheid in de dispersieberekeningen en gemodelleerde verkeersgeïnduceerde turbulentie. Er is echter geen verdere analyse uitgevoerd naar de gevoeligheid voor de vermelde onzekerheden.

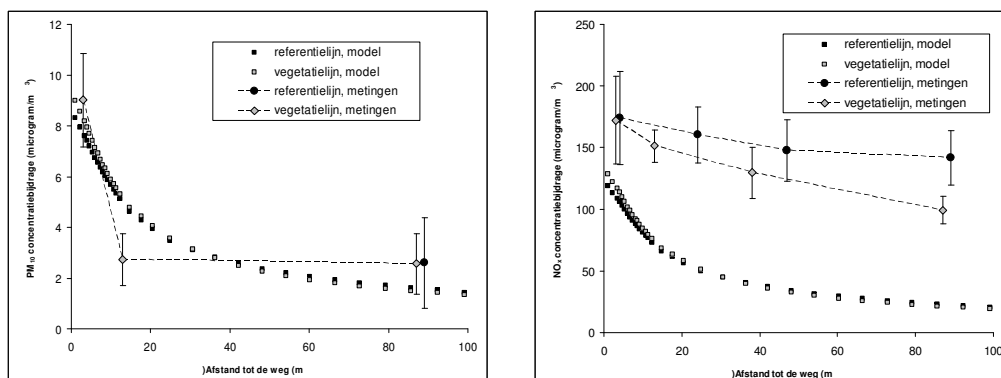
Figuur 33

Vergelijking gemodelleerde en gemeten windsnelheden op 2m hoogte (bron: [10])



Figuur 34

Vergelijking concentratiebijdrages van het verkeer PM_{10} - (links) en NO_x (rechts) op 1.5m hoogte als functie van de afstand tot de weg (bron: [10])



Aanvullend aan deze validatie-studie is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om de onzekerheid in het model te bestuderen en de effecten van vegetatie verder te kwantificeren. Achtereenvolgens werden de volgende inputvariabelen gevarieerd en de resultaten zijn vergeleken met de modelanalyse zoals hierboven beschreven (26 juni 2008, 13-16u), tabel 2 geeft de relatieve effecten van de vegetatie op de wegbijdragen in de concentraties NO_x en PM_{10} :

- Windrichting: 270° - de variatie van 30° heeft nauwelijks invloed¹
- Verdubbeling windsnelheid: geen invloed op de relatieve effecten van vegetatie
- Oppervlakte ruwheid bodem 10cm: verhoging oppervlakteruwheid heeft nauwelijks effect
- Depositiesnelheid nul: Nauwelijks verandering van in de vegetatie effecten. Dit wijst erop dat de rol van depositie minimaal is in de geanalyseerde situatie en dat de effecten voornamelijk veroorzaakt worden door de aerodynamische effecten van de vegetatie
- Dichte vegetatie: $LAD=1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ en breedte vegetatie uniform 8 m: versterking van het vegetatie effect zowel negatief vlak voor en achter de vegetatie, als positief verder weg van de vegetatie, de berekende reducties verder weg zijn

¹ Opmerking: Hier loopt de A50 niet perfect noord-zuid, maar wijkt ongeveer 10° af. Loodrechte aanstroming is er bij een windrichting van 260° . Het relatieve verschil ten opzichte van de weg tussen windrichtingen 240° en 270° is dus eigenlijk maar 10° .

vergelijkbaar met de eerdere modelanalyse voor deze locatie met het Envi-met model (zie bovenstaande paragraaf)

- Wintersituatie: LAD tussen 0.06 en 0.1 m²/m³: Concentraties verder van de weg verminderen minder sterk dan in de zomer.

De vegetatie-effecten zoals berekend door PanAir zijn vrij klein en vrijwel gelijk voor NO_x en PM₁₀ omdat de effecten van verstoring van de stroming overheersen (en die zijn gelijk voor beide stoffen) en afvangst in het gewas een te verwaarlozen effect heeft. Afvangst is wel verschillend voor NO_x en PM₁₀ maar dat komt in het overall effect niet tot uiting omdat het afvangsteffect veel kleiner is als het obstakeleffect.

Tabel 2

Het gemodelleerde vegetatie-effect (%) voor PM₁₀ en NO_x 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 (bron: [10])

Afstand tot de weg (m)	Standaard situatie: 26 juni 2008 13-16 uur		Windrichting is 270°		Windsnelheid verdubbeld		z ₀ = 10 cm		Depositie-snelheid = 0		Dichte vegetatie		Winter-vegetatie	
	PM ₁₀	NO _x	PM ₁₀	NO _x	PM ₁₀	NO _x	PM ₁₀	NO _x	PM ₁₀	NO _x	PM ₁₀	NO _x	PM ₁₀	NO _x
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

4.2.4

Vegetatie voor een betere Luchtkwaliteit: Prceel II – A50 Valburg

Ook dit rapport beschrijft een gecombineerde studie van een langdurige meetcampagne en modelanalyse. De modelanalyse is opnieuw uitgevoerd door VITO met behulp van het CFD-pakket Envi-met. Zes dagen en zes nachten zijn geselecteerd voor de modelanalyse. De selectie van de dagen gebeurde op basis van de beschikbaarheid van meetgegevens en meteorologische condities. Op de geselecteerde dagen staat de wind loodrecht op de weg binnen een marge van 10°. Ook is de variatie in windsnelheid en atmosferische stabiliteit minimaal tijdens deze dagen. De verschillende dagen en nachten zijn in meer of mindere mate representatief voor verschillende stabiliteitsklassen gaande van sterk en licht stabiel (nachten) tot neutraal en licht instabiel (dagen). Omwille van de beschikbare data en de toestand van de vegetatie beperkt deze studie zich tot de dennenbomen en werden de lindes buiten beschouwing gelaten.

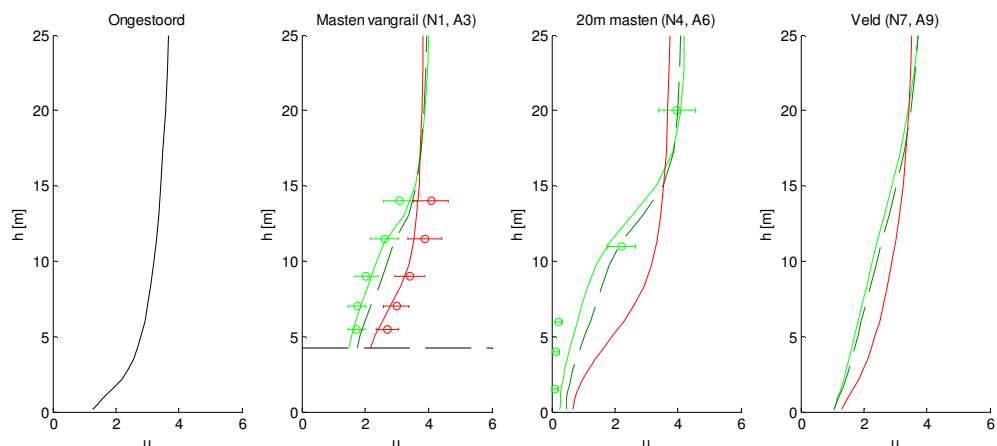
Deze modelanalyse verschilt sterk van de eerder beschreven studies in die zin dat de onderzoekers gepoogd hebben het effect van verschillende stabiliteitsklassen in rekening te brengen, daar waar in bovenstaande onderzoeken steeds een neutrale atmosfeer verondersteld werd, zoals trouwens gebruikelijk is in de meeste CFD-gebaseerde dispersiemodellen alsook in de meeste windtunnel analyses. De onderzoekers geven dan ook aan dat gezien het experimentele karakter van dit onderzoek de resultaten als voorwaardelijk aanschouwd dienen te worden. Bijkomende moeilijkheid in deze analyse was het feit dat de A50 hier op een verhoogde berm ligt.

Tijdens de meetcampagne zijn de snelheidsprofielen voor en achter de vegetatie, alsook in het referentieveld op de verhoogde weginrichting uitvoerig gemeten. Dit maakt een uitgebreide validatie van de effecten van zowel de vegetatie als de

verhoogde weginrichting op het snelheidsveld mogelijk. In eerste instantie werd voor de modelanalyse de LAD gebruikt zoals lokaal gemeten. Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde snelheidsprofielen voor en achter de vegetatie tonen echter aan dat een verhoogde LAD in het model een betere match leverde met de snelheidsprofielen, zoals ook geïllustreerd in figuur 35, waar het gemiddelde snelheidsprofiel voor en achter de vegetatie alsook de referentie op de verhoogde weginrichting vergeleken worden met de metingen.

Figuur 35

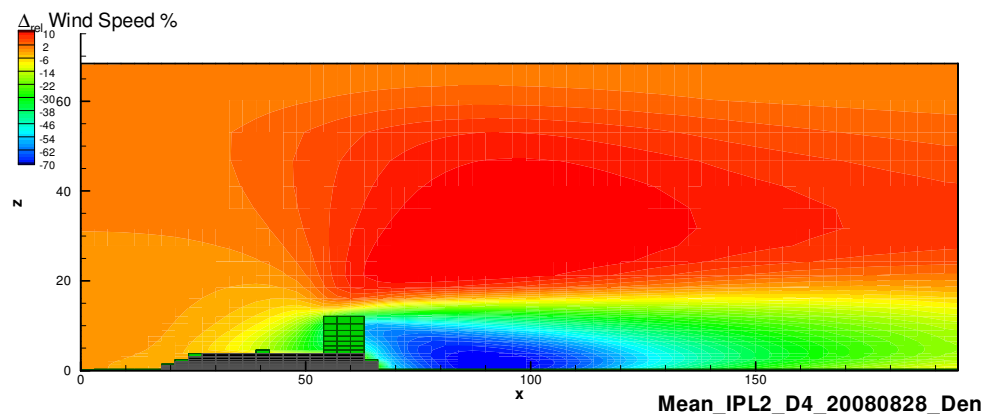
Gemeten en gemodelleerde snelheidsprofielen voor en achter de vegetatie (groen, - LAD $1.2\text{m}^2/\text{m}^3$, -- LAD $0.5\text{m}^2/\text{m}^3$) en referentie (rood). Masten N1 en A3 bevinden zich op de verhoogde berm (bron: DVS-012-2009)



Vergelijking van de andere dagen en nachten – opgenomen in de bijlage van het rapport – tonen aan dat in het algemeen de gemodelleerde snelheidsprofielen, zowel voor de dagen als nachten, de gemeten profielen goed representeren. Voor een aantal nachten worden in het model de profielen zowel langs de vegetatielijns als de referentie licht overschat. De onderzoekers geven aan dat mogelijk in deze gevallen het initiële snelheidsprofiel – voorgeschreven op de instroomranden van het domein en gebaseerd op basis van metingen op de meteorologische meetmast “Haarweg” op enige afstand van de meetlocatie — reeds het werkelijke snelheidsprofiel overschat. Figuur 36 en figuur 37 illustreren het effect van de atmosferische stabiliteit zoals dat nu in Envi-met is verwerkt op de effecten van de aanwezigheid van vegetatie op het lokale windveld (contourplots analoog aan deze in figuur 29 tot figuur 31). Voor beide dagen/nachten is de referentiewindsnelheid ongeveer gelijk. Echter tijdens de dag, met een turbulente atmosfeer, is de snelheidsreductie ten gevolge van de vegetatie groter dan tijdens de gemodelleerde nacht – bij een stabiele atmosfeer. Het valt ook op dat de reductie veel verder reikt tijdens de dag dan de tijdens de nacht: een snelheidsreductie van ruim 50% reikt horizontaal tot ruim 10 maal de hoogte van de vegetatie. Dit gegeven wordt in het algemeen ook wel door literatuur bevestigd. In het geval van een stabiele atmosfeer komt de windsnelheid sneller terug tot de ongestoorde snelheid. Vergelijken we nu deze constatering met de windsnelheid in figuur 24 dan valt het op dat hier het effect van de vegetatie op het windveld minder ver reikt dan gemeten werd. In de vorige analyses werd echter steeds een neutrale atmosfeer verondersteld.

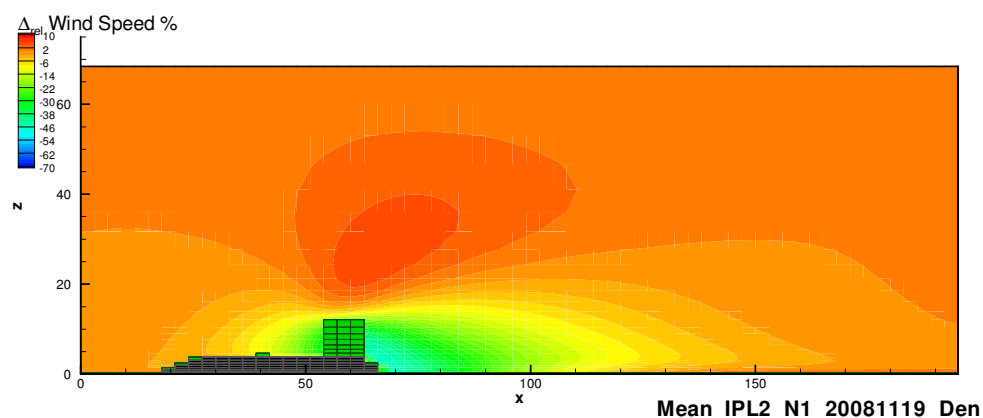
Figuur 36

Relatief effect vegetatie op het windveld voor één van de gemodelleerde dagen 28/08/2008 (bron: DVS-012-2009)



Figuur 37

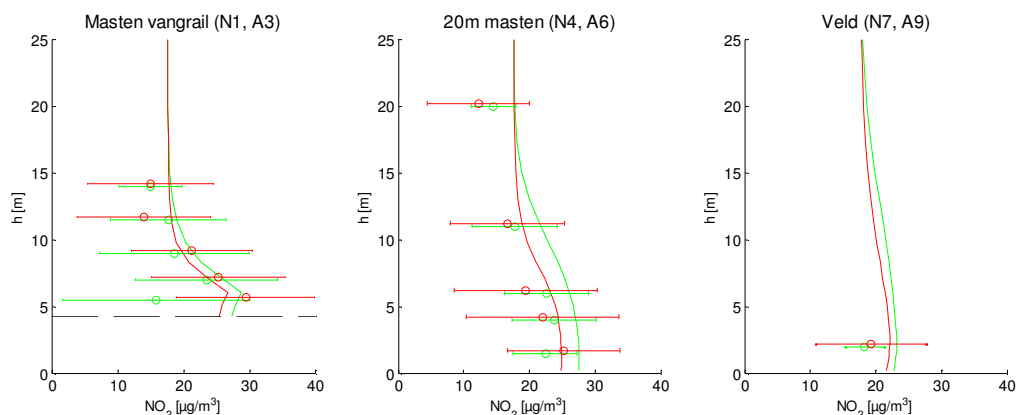
Relatief effect vegetatie op het windveld voor één van de gemodelleerde nachten 19/11/2008 (bron: DVS-012-2009)



Validatie van de concentratieprofielen van PM_{10} , NO en NO_2 bleek een stuk minder eenvoudig dan verwacht. Wat betreft PM_{10} lag dit vooral aan het type toestel dat gebruikt is voor de metingen. Voor de NO_x profielen werden systematische verschillen geconstateerd tussen de verschillende monitoren, die het onmogelijk maken de metingen langs de vegetatielijn en referentieveld met elkaar te vergelijken. De effecten die door het model voorspeld worden, liggen bovendien grotendeels binnen de standaardafwijking van de metingen, zie ook figuur 38 ter illustratie. Gezien de grote onzekerheden bij de metingen vallen op de meeste dagen en nachten de gemodelleerde concentraties binnen de spreiding van de metingen. Een systematische onderschatting van de NO_2 -concentraties zoals in de PANAIR modelberekeningen voor perceel I worden in deze analyse niet waargenomen. Voor dit onderzoek werden de nieuwste inzichten voor de emissiefactoren gebruikt. Verder was ditmaal een gedetailleerde verkeerstelling voorhanden, hetgeen naar verwachting de kwaliteit van de berekende emissies ten goede zal komen.

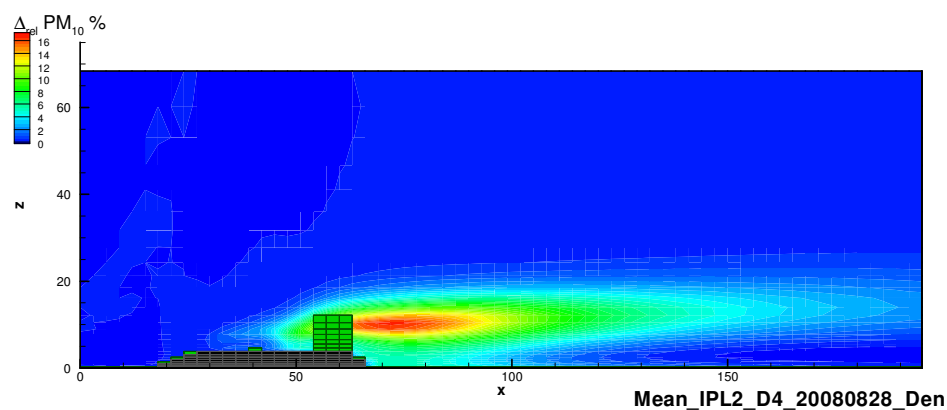
Figuur 38

Gemeten en gemodelleerde NO_2 -concentratie profielen voor en achter de vegetatie (groen) en referentie (rood). Masten N1 en A3 bevinden zicht op de verhoogde berm (bron: DVS-012-2009)



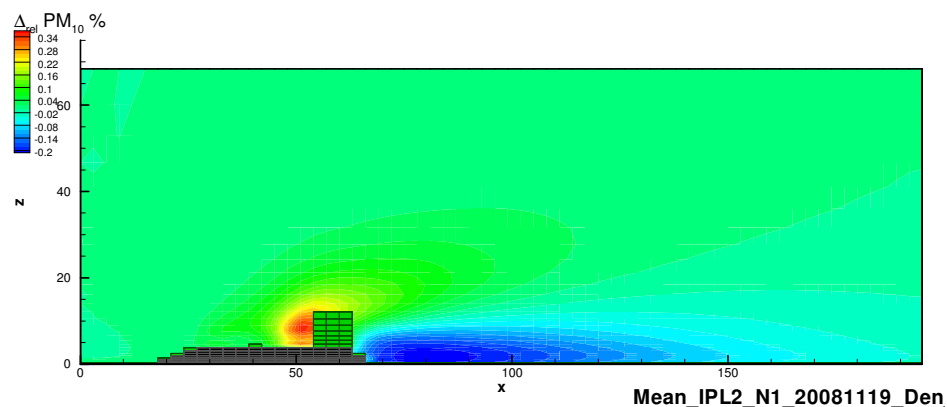
Figuur 39

Relatief effect vegetatie op de PM_{10} concentraties voor één van de gemodelleerde dagen 28/08/2008 (bron: DVS-012-2009)



Figuur 40

Relatief effect vegetatie op de PM_{10} concentraties voor één van de gemodelleerde nachten 19/11/2008 (bron: DVS-012-2009)



Figuur 39 en figuur 40 tonen het relatieve effect van de vegetatie op de PM_{10} -concentraties voor één van de gemodelleerde dagen (turbulente atmosfeer) en nachten (stabiële atmosfeer). Voor NO en NO_2 werden vergelijkbare resultaten gevonden. Het valt op dat voor een stabiel tot neutrale atmosfeer de effecten van de vegetatie in grote lijnen overeenkomen met deze zoals beschreven in de vorige Envi-met analyse van de meetcampagne Vaassen 2006 (figuur 28 en figuur 29): een lokale verhoging voor en vlak na de vegetatie en een ruime zone met een beperkte reductie. De lage percentages hebben vooral te maken met het feit dat in deze analyse enerzijds een hogere achtergrondconcentratie gebruikt is en vooral dat

er gedurende de nacht nauwelijks verkeersemisseries zijn. Omdat de verkeersbijdrage gedurende de nacht miniem is, zal ook het kwantitatieve effect van vegetatie op de totale concentratie minimaal zijn.

Bij een turbulente atmosfeer is het gemodelleerde effect echter voornamelijk negatief, met een sterk verhoogde concentratie zowel voor als achter de vegetatie. De onderzoekers geven hiervoor twee mogelijke mechanismen:

- Enerzijds werd reeds aangetoond dat, onder de aannames in Envi-met, bij een minder stabiele atmosfeer het effect van de vegetatie op het snelheidsveld groter werd. De sterkere snelheidsreductie ter plekke van de emissies zal leiden tot een sterkere concentratieverhoging zowel voor als achter de vegetatie.
- Mogelijk dat de mechanische turbulentie gegenereerd door de vegetatie relatief een kleinere bijdrage levert tot de totale turbulente kinetische energie, waardoor het effect van extra verticale menging achter de vegetatie kleiner wordt en bijgevolg het totale effect van de vegetatie overwegend negatief uitslaat. Er zijn echter geen turbulentieingen uitvoerd. Bijgevolg was het niet mogelijk de effecten van de vegetatie op de turbulentie te valideren.

De onderzoekers geven in het rapport te kennen dat deze bevindingen slechts in beperkte mate gevalideerd konden worden en als dusdanig ook zo geïnterpreteerd dienen te worden. De modelresultaten bevestigen wel dat de effecten van een vegetatiebarrière beïnvloed worden door de stabiliteit van de atmosfeer. De mate waarin dit gebeurt is echter nog onzeker. De onderzoekers geven ook aan dat in vergelijking met de campagne en analyse langs de A50 in Vaassen de dennen een quasi uniforme LAD hebben tot op de grond. Door de poreuze ondergroei in de vegetatie van Vaassen is er nog enige doorstroming op lage hoogte. Dit zorgt op zich voor een lager barrière effect en een verhoogde turbulentie op lage hoogte achter de vegetatie, daar waar bij de dennen de extra mechanische turbulente voornamelijk ter hoogte van de boomtoppen gegenereerd wordt.

Aansluitend op de CFD-analyses bevat het rapport ook een eerste aanzet tot een operationeel model op basis van een gemodificeerd pluimmodel. Dit deelonderzoek van het rapport werd uitgevoerd door KEMA. Als uitgangspunt zijn eerst de relevante mechanismen voor de invloed van vegetatie op luchtkwaliteit geïnventariseerd op basis van de beschikbare literatuur. In essentie komt deze invloed neer op het beïnvloeden van de stroming en het wegnemen van verontreiniging.

Voor de opname van een vegetatiemodule in de gangbare rekenmodellen voor pluimverspreiding is dit vertaald in een aantal processen die zijn omgezet naar wiskundige formules. Naast de parameterisatie vormt het splitsen van de pluim in een deel dat door de vegetatie stroomt en een deel dat om de vegetatie heen buigt een opvallend element.

Vooruitlopend op de uitgewerkte meetset en CFD-resultaten is een verkenning uitgevoerd op eerdere ENVI-met-resultaten om na te gaan hoe de CFD-profielen matchen met de profielen van het pluimmodel. Hoewel de gevonden correlatie zeker goed te noemen is, blijken juist de subtiele vegetatie-effecten op geringe hoogtes niet zonder de beschreven complexe aanpassing in de modellering reproduceerbaar. Omdat de vegetatiemodule deels direct en deels via een CFD tussenstap leunt op parameterisaties van meetresultaten kon de module niet serieus worden getest. De waarde ervan is derhalve nog niet vastgesteld. Los hiervan is onduidelijk hoe zou worden omgegaan met andere situaties dan die zijn doorgemeten.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Inleiding

Literatuuronderzoek toonde aan dat er potentie is voor het aanplanten van vegetatie langs (snel)wegen als middel om de luchtkwaliteit te verbeteren. Met name de aanleg van vegetatiestroken langs de snelweg lijkt volgens de literatuur een goed idee. Helaas zijn in de huidige literatuur geen relevante meetgegevens te vinden. Daarom werd besloten om in het kader van IPL de benodigde kennis te vergaren door het verrichten van gerichte meetcampagnes.

5.2 Conclusies op basis van de metingen

De nieuwe kennis vergaard via drie meetcampagnes (perceel I pilot- en vervolgstudie, Perceel II 1 studie), leiden tot de volgende conclusies

Perceel I:

- De windsnelheid neemt achter de vegetatie tot 90m afstand van de weg duidelijk af in vergelijking met de referentiezijde. De maximale afname is ongeveer 60% op 35-40m afstand van de weg. In de wintersituatie zonder blad aan de bomen geldt nog steeds een afname in windsnelheid over alle afstanden vanaf de weg gemeten. Deze afname is in de winter wel minder sterk met een maximale afname van ongeveer 30%.
- Verlaging van NO_x concentraties is waarneembaar op grotere afstand vanaf de weg, vanaf ongeveer 30-40m. In zowel de pilotstudie als in de vervolgstudie in Vaassen is dit aangetoond, hoewel de resultaten in bijna alle gevallen niet statistisch significant zijn. De verlaging voor NO_x is op 90m ongeveer 30% en in de pilotstudie wordt voor NO_2 een significante verlaging van 20% genoemd. Verschil tussen beide studies is vooral dat in de vervolgstudie voor NO_2 pas een verlaging optreedt vanaf 90m en dit in de pilotstudie al bij 30m is. Beide studies geven aan dat de concentraties van NO_2 direct achter de vegetatie enigszins verhoogd zijn, deze verhoging bestrijkt een gebied van ongeveer 30-50 meter vanaf de wegrand. Dit wordt veroorzaakt door een combinatie van extra inmenging van Ozon en een verminderde windsnelheid achter de vegetatie. In de winter levert de vegetatie juist een verhoging van de verkeersbijdrage van zelfs 70% voor NO_x op 90m afstand. In beide studies is geen aanwijzing gevonden voor een significant effect van opname van NO_x -concentraties in de vegetatiestrook. Wel is er sprake van verdunning waardoor op grotere afstand (vanaf 30-40m) een effect van de vegetatiestrook aan te nemen is. De exacte grootte van deze effecten is niet zeer betrouwbaar aan te geven door de hoge standaarddeviaties van de gemiddelde concentraties en door de onzekerheid die is opgetreden door de correctiefactoren die zijn toegepast op de data.
- De invloed van vegetatie op fijn stof is aanzienlijk moeilijker vast te stellen door de relatief kleine bijdrage van het wegverkeer en nog grotere beperkingen in de nauwkeurigheid van de beschikbare meetapparatuur dan voor NO_x . In geen enkel project is het gelukt om opname door de vegetatie aan te tonen, al zijn er wel aanwijzingen dat enig effect vooral voor de grovere deeltjes (tussen PM_{10} en $\text{PM}_{2.5}$) aanwezig is. Wel zijn de effecten ten gevolge van de verstoring van de aanstroming ook voor fijn stof aangetoond. Omdat voor fijn stof de extra bijmenging van Ozon geen rol speelt wordt op korte afstand van de vegetatie een minder sterke concentratieverhoging gevonden. De vermindering van de concentratie op grotere afstand van de wegrand (30-100 m) is ongeveer 10%. Ook dit resultaat is niet statistisch significant.

Perceel II:

- Op dit moment zijn alleen resultaten betrouwbaar voor de invloed van de vegetatie met naaldbomen op de PM₁₀ concentraties. De concentratievermindering op 30m van de rand van de weg is net significant en bepaald op 10% ± 8%. Voorbehoud bij dit resultaat is de mogelijke invloed van het aanwezige hoge talud, leidend tot een vermindering van de concentraties door extra turbulentie.

De conclusies van de metingen zijn in Tabel a1 op een rij gezet om een duidelijk overzicht te verkrijgen.

Tabel a1

Resultaten van de verschillende metingen uitgedrukt als effect in verlaging van de verkeersbijdrage aan de concentratie door vegetatieinvloed ten opzichte van de referentie (Bron: [5,10,11,13])
nd = geen data beschikbaar

Parameter	Vaassen 2006 5 meetdagen	Vaassen 2008 (6 weken, zomer)	Vaassen 2009 (3 weken, winter)	Valburg 2009
NO ₂	<30m: negatief 90m: 20%	<40m: negatief 90m: 30%	Negatief	nd
PM ₁₀ (Teom)	nb	90m: 8% ± 14%	nd	30m: 10%± 8% (naaldbomen)
Aantallen deeltjes	10m: 20% depositie PM ₁₀ - 2.5 90m: nihil	2%	nd	nd
Windsnelheid (% afname)	35m: 60-70%	40m: 70%	40m: <30%	nd

5.3

Conclusies op basis van de modelstudies

In hoofdstuk 4 zijn de vier modelanalyses, uitgevoerd binnen het IPL-project vegetatie, samengevat en vergeleken. De analyses zijn uitgevoerd door twee verschillende onderzoeksinstituten TNO en VITO. VITO gebruikt voor haar onderzoeken het Envi-met model, TNO gebruikt PANAIIR. Beide modellen zijn CFD-gebaseerd en kort vergeleken in hoofdstuk 4.1. Hoewel de modellen gebaseerd zijn op dezelfde basisprincipes, verschillen zij toch in een aantal opzichten. Ook de aanpak van de onderzoekers is licht verschillend.

De eerste drie rapportages geven in meer of mindere mate een gelijkaardig effect van de vegetatie op de lokale luchtkwaliteit. Ten gevolge van de vegetatie zullen de concentraties vlak voor en vlak achter de vegetatie toenemen. Op zekere afstand achter de vegetatie wordt een lichte reductie van de concentraties gemodelleerd. Zowel VITO met Envi-met als TNO met PANAIIR voorspellen voor de locatie A50-Vaassen vanaf 20 à 30 meter afstand van de weg een reductie tussen de vijf en de tien procent. Omdat het Envi-met model het effect van chemische reacties van NO_x en ozon mee in rekening brengt, voorspelt Envi-met voor NO zelfs een reductie van meer dan tien procent. Vergeleken met de beschikbare meetgegevens reproduceert het PANAIIR model slechts in beperkte mate de snelheidsreductie ten gevolge van de vegetatiebarrière. Het Envi-met model is in staat de snelheidsreductie voor en achter de vegetatie vrij goed te voorspellen, echter verder weg van de vegetatie neemt de windsnelheid sneller toe dan waargenomen tijdens de metingen. Beide modellen hebben de neiging de NO₂-concentraties, of NO_x in geval van PANAIIR, te

onderschatten. Mogelijk dat dit eerder ligt aan de gebruikte emissiefactoren dan aan het model zelf.

De laatste analyse met behulp van het Envi-met model voor de meetlocatie A50 – Valburg wijkt in zekere mate af van alle voorgaande studies. In tegenstelling tot bovenvermelde analyses werd door de onderzoekers gepoogd het effect van de atmosferische stabiliteit in rekening te brengen, daar waar voor eerdere CFD-analyses enkel met een neutrale atmosfeer gerekend werd. De resultaten wijken dan ook in meer of mindere mate af van voorgaande bevindingen. In geval van een stabiele of neutrale atmosfeer komen de resultaten nog wel overeen met de eerdere bevindingen. Echter, in het geval van een turbulente atmosfeer worden hoofdzakelijk negatieve effecten als gevolg van de vegetatie geconstateerd. Ook werd geconstateerd dat onder een meer turbulente atmosfeer de reductie in windsnelheid hoger was en eveneens verder reikt. De onderzoekers geven aan dat dit echter voorlopige resultaten zijn die slechts in beperkte mate gevalideerd konden worden en dat deze dan ook als dusdanig geïnterpreteerd dienen te worden. De systematische onderschatting van de NO_2 -concentraties werd hier niet langer waargenomen dankzij verbeterde emissiefactoren.

In de vier analyses werd geconstateerd dat het effect van depositie minimaal was vergeleken met de aerodynamische effecten. Enkel het artificieel verhogen van de depositiesnelheden leidt tot een significante opname. Er bestaat echter nog grote onzekerheid over de werkelijke depositiesnelheden voor dit soort van configuraties.

5.4 Aanbevelingen

De onderzochte lineaire beplantingselementen verhogen de concentraties van PM_{10} en NO_2 op korte afstand windafwaarts van de vegetatie. De verstoring van het windprofiel is de oorzaak van dit effect, leidend tot een afname van de gemiddelde wind achter de vegetatie en draaiing van de wind naar een richting meer parallel aan de snelweg. Verder wordt de omzetting van NO naar NO_2 bevorderd door een betere inmenging van O_3 . De gemeten effecten komen redelijk goed overeen met de uitkomsten van de (CFD) modellering met de twee verschillende modellen. Pas op grotere afstanden van de weg (50-90m en verder) lijkt een kleine verbetering in de luchtkwaliteit waarneembaar, ook te danken aan de verhoogde turbulentie, geïnduceerd door de ruwheidselementen van de vegetatie. Voor een meetbare invang van PM of NO_x blijken de beproefde vegetatiestroken niet effectief genoeg, zowel de metingen als de modellering geven dit aan.

Overschrijdingen van de normen van de luchtkwaliteit vinden voornamelijk plaats op plekken binnen de eerste 100 meter afstand van de snelweg. Op afstanden groter dan 100 meter van de snelweg vindt alleen overschrijding plaats als de achtergrondconcentratie al heel dicht bij de grenswaarde ligt of in het geval van grote verkeersknooppunten en tunnelmonden.

Het lijkt daarom verstandig om beplanting langs snelwegen alleen te overwegen voor andere redenen dan verbetering van de luchtkwaliteit en om juist in het geval van benadering van de kritische waarden voor luchtkwaliteit af te zien van het gebruik van beplanting in de buurt van de snelweg.

Gezien de lage depositiesnelheid van NO_2 en PM_{10} is substantiële reductie van de concentraties pas te verwachten als beïnvloeding plaatsvindt over grotere stukken vegetatie, in de orde van grootte van honderden meters tot kilometers.

Referenties

[a] Regressietool ontwikkeld door RIVM voor intern gebruik, en mondelinge toelichting daarop door Beijl, 2009.

[b] Wesseling JP, J Duyzer, AEG Tonneijck, CJ van Dijk, 2004. Effecten van groenelementen op NO₂ en PM₁₀ concentraties in de buitenlucht. TNO, rapport R2004/383

[c] IPL Proeftuin Invloed Schermen op luchtkwaliteit.
<http://www.ipluchtkwaliteit.nl/project.php?name=schermwering>

[d] Hofschreuder P, F Tonneijck, E Hofschreuder., 2005. Optimalisatie van geluidsschermen voor verbetering van de luchtkwaliteit. Wageningen, A&F, rapport #

[1] Workshop Vegetatie-Luchtkwaliteit. 27 juli 2006 Bomencentrum Baarn. Verslag DWW-2006-070/IPL 06.00014

[2] Heslen JJG & Koopmans JFW, 2006. Actualisatie literatuuronderzoek "Beplanting en Luchtkwaliteit". Peutz, Rapport FL-17485-1.

[3] Swaagstra AH & PP de Kluiver, 2006. IPL pilot Effect op luchtkwaliteit van vegetatie langs snelwegen - Inventarisatie meetlocaties t.b.v. zomermeting. ES consulting, rapport.

[4] Burg A. Van den, Swaagstra H, Loef P, Broer W, Cohen G, 2006. Kennisdocument Vegetatie-luchtkwaliteit ten behoeve van het uitvoeren van een pilotproject langs rijkswegen. DWW 2006-094 /IPL 06.00019

[5] Weijers EP, Kos GPA, Bulk WCM van den & Vermeulen AT, 2007. Onderzoek naar de luchtkwaliteit rondom een vegetatiestrook langs de snelweg. ECN, Petten, rapport ECN-E--07-011

[6] Brochure prijsvraag vegetatie, juli 2007. DWW-2007-031.

[7] Voorstudie ten behoeve van het uitvoeren van een pilot project langs rijkswegen: Update en gevoeligheidsanalyse van de vegetatiemodule in het Envi-met model; J. Vankerkom, B. De Maerschallck, S; Janssen en Fred Toneijk, VITO – Triple E, DVS-2008-001, December 2007.

[8] Modelanalyse van de IPL meetcampagne langs de A50 te Vaassen ter bepaling van het effect van vegetatie op luchtkwaliteit langs snelwegen: Envi-met modelering van de ECN 2006 meetcampagne te Vaassen; S. Janssen, B. De Maerschallck, J. Vankerkom en J. Vliegen, VITO, DVS-2008-044, Juli 2008.

[9] Vermeulen AT, A Kraai, JH Duyzer, EJKlok, AA Pronk, 2008. Ontwikkelrapport perceel 1 prijsvraag vegetatie, maart 2008. Rapportnr. DVS-2008-026

- [10] Vermeulen AT, A Kraai, JH Duyzer, EJKlok, AA Pronk, 2009. Vegetatie voor een betere Luchtkwaliteit: Perceel I – A50 Vaassen., ECN – TNO – RPI, DVS-2009-012/ECN-O—09-016.
- [11] Ontwikkeldrapport perceel 2 prijsvraag vegetatie, juni 2008. Rapportnr. DVS-2008-028.
- [12] Vegetatie voor een betere luchtkwaliteit: Perceel II – A50 Valburg; Stadsregio Arnhem Nijmegen – KEMA – WUR – Alterra – Integralis PP BV – VITO, DVS-2009-019, Juli 2009.
- [13] Hoogwerff J & Heijden WJ van der, 2009. Aanvullende metingen met TEOM's langs de A50 bij Valburg-Heteren. M+P, IPL rapportnr DVS-006-2009.
- [14] Modelanalyse IPL meetcampagne langs A50 bij Vaassen, juli 2008. Rapportnr. DVS-2008-044 (VITO: 2008/IMS/R/241) door VITO
- [15] Verslag marktconsultatie te Groeneveld, mei 2007. Rapportnr. DWW-2007-030.
- [16] "Eindrapport Proeftuin Schermen", DVS-rapport DVS-2009-014, november 2009.
- [17] Invloed schermen op de luchtkwaliteit, Eindrapport onderzoek naar de werking van (geluids)schermen op de luchtkwaliteit langs snelwegen, december 2009, rapportnummer IPL-1a.

Bijlage A Perceel I Locatie Vaassen

Locatie 1: A50 ter hoogte van Vaassen

Ligging haag/groenstructuur:

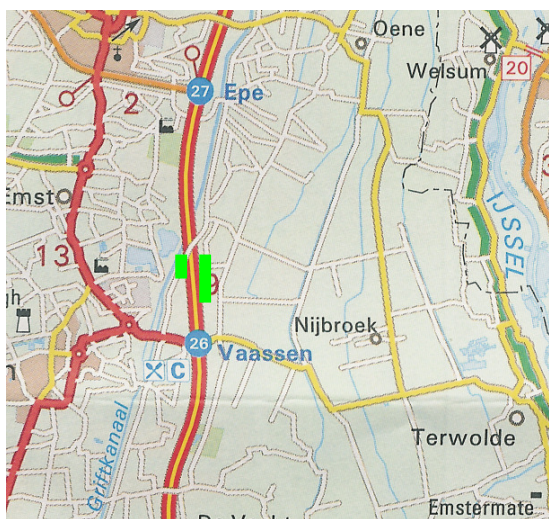
Locatie: langs de A50 ten noorden van afslag 26 Vaassen.

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

Figuur a1

Locatie perceel I bij Vaassen

Noord



Kenmerken meetlocatie (van zuid naar noord):

350m (hmp 216.3 - 216.6): open.

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

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

Hoogte: 8-11m

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

Dichtheid: constant

Soorten: n.t.b.

Bereikbaarheid:

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

Achterzijde: achter noordelijk deel ligt een ventweg

Overzijde: plaatselijk via insteken bereikbaar

Beschrijving/karakteristiek haag/vegetatie:

De vegetatie bestaat uit bladverliezende bomen en struiken gesitueerd in haagsgewijze opstand.

De openheid in wintertoestand bedraagt gemiddeld meer dan 50%.

De openheid in de zomertoestand bedraagt naar schatting 30% - 40% voor de bomen doch voor de onderbegroeiing van struiken 40% - 50%.

Bij winddruk is de openheid groter door dat de haag als gevolg van de beperkte breedte meer doorlatend reageert. De openheid bedraagt dan 40% - 50%.

Figuur a2

Locatie 1 A50 Vaassen:
Oostzijde; voorzijde haag
met smalle grastrook (1)



Foto: Es Consulting

Figuur a3

Locatie 1 A50 Vaassen:
Oostzijde; achterzijde haag
met ventweg en open
weiland (2)



Foto: ES Consulting

Figuur a4

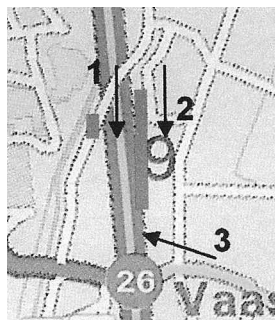
Locatie 1 A50 Vaassen:
Open terrein (3)



Foto: Es Consulting

Figuur a5

Locatie 1 A50 Vaassen:
Posities en richting van
foto's a2-a4



Windklimaat:

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

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

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

Conformiteit eisen meetlocatie:

De haag dient aan alle eisen voor de meetlocatie te voldoen om geschikt te zijn voor het meetprogramma.

De geschiktheid is per criterium aangegeven. Een codering matig in de reeks is acceptabel, doch een codering onvoldoende maakt de vegetatie/haag ongeschikt als meetlocatie.

Criterium	Beoordeling	Opm
a) Ligging langs een snelweg of drukke provinciale weg	+	
b) Meetlocatie windafwaarts van de weg voor min. 50% van de tijd	+	
c) Wind staat maximaal onder 45 gr op de groenstructuur	o	
d) Opstelruimte meetapparatuur voor en achter de groenstructuur	o	Wegzijde krap
e) Naast wegvak met vegetatie is wegvak (vrijwel) zonder vegetatie	+	
f) Hoogte vegetatie 6-10m	+	
g) Gelijkmatische dichtheid van vegetatie over de	+	

hele hoogte		
h) Profiel van voet tot kruin uniform	+	
i) Openheid vegetatie 30-40%	o	

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

Conclusie:

De geschiktheid van de locatie hangt met name af van de plaatsingsmogelijkheid van de meetmast in het gedeelte tussen wegvak en haag.

De haag is in juni voor 70,1% , in juli 70,7% en in augustus 66,8% van de tijd aan wind van wegvak naar haag blootgesteld. In juni is er echter maar 32,4%, in juli 35,7% en in augustus 28,9% van de tijd sprake van een hoek van de wind $\leq 45^\circ$.

De windluwe periode (6,4% voor juni / 7,1% voor juli / 8,6% voor augustus) is echter gunstig omdat door ligging van de haag nabij het wegvak de rijwind van het verkeer gassen en stoffen naar de haag zal voeren.

De openheid bij winddruk (gevolg van geringe breedte haag gerelateerd aan openheid) resulteert in een hogere doorstroombaarheid dan gewenst uit oogpunt van ontwerpcriteria, hetgeen kan leiden tot concentratieverhogingen kort achter de haag.

Bij lage windsnelheden doet dit fenomeen zich in veel beperktere mate voor.

Bijlage B Locatie perceel II (Valburg)

Locatie 1: A50 ter hoogte van Valburg

Ligging haag/groenstructuur:

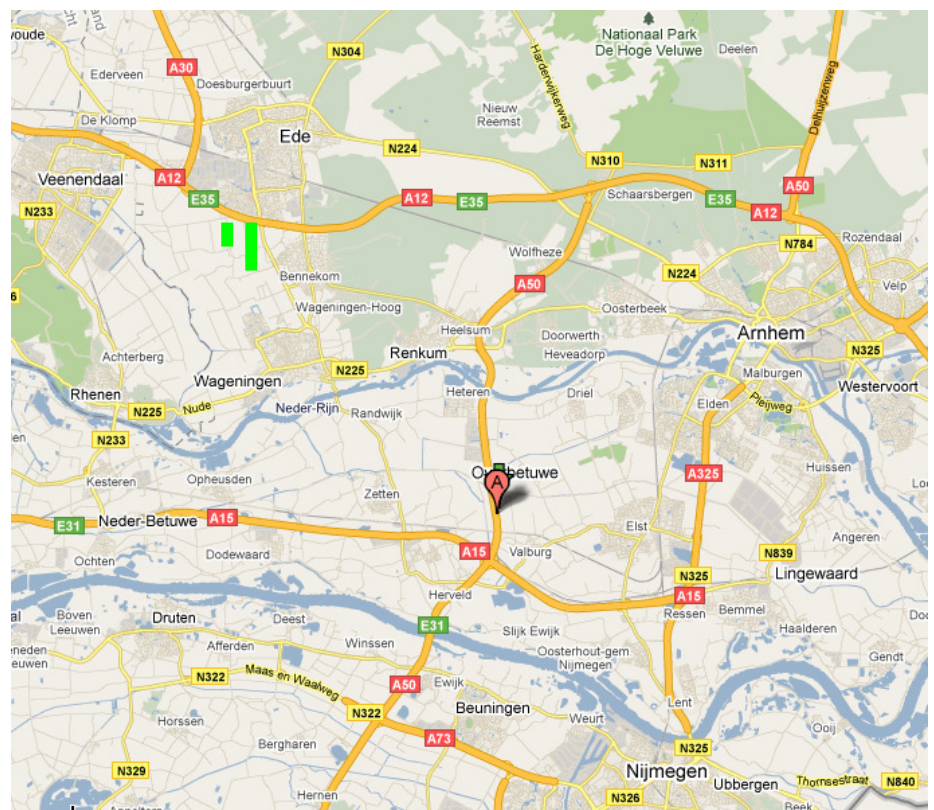
Locatie: langs de A50 ten noorden van afslag Valburg.

Oriëntatie: van zuid-zuidoost 160° naar noordnoordwest 340°.

Figuur b1

Locatie perceel II bij
Valburg

Noord



Kenmerken meetlocatie (van zuid naar noord):

Ten noorden van de meetlocatie ligt parkeerplaats Meilanden. Net ten zuiden van de locatie kruist de A50 de A26 en de spoorlijn Arnhem-Tiel. De berm ter plaatse is tussen de 2 en 4 meter hoger dan het omliggende land.

Bereikbaarheid:

Goed, via parkeerplaats Meilanden.

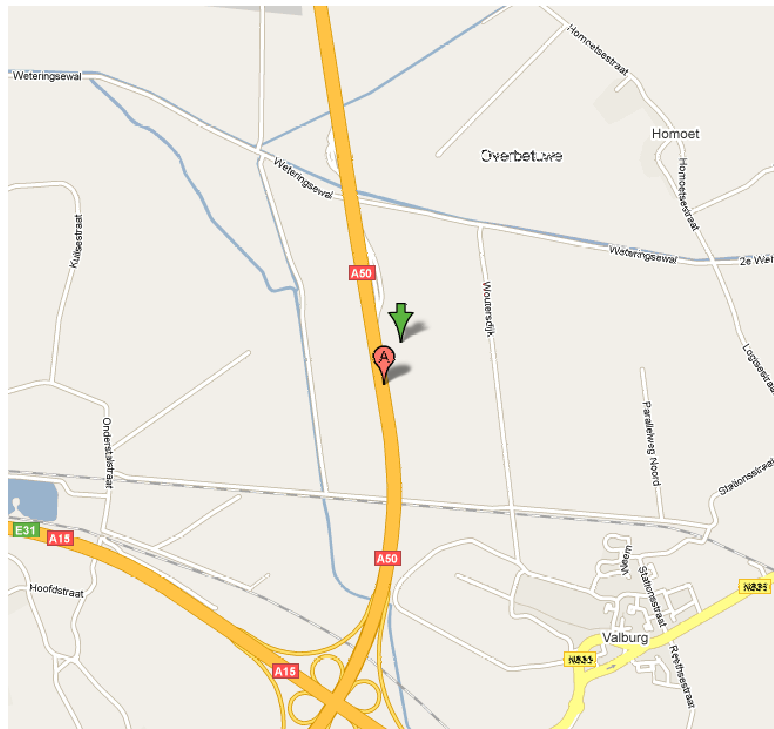
Beschrijving/karakteristiek haag/vegetatie:

De geplaatste vegetatie bestaat uit een strook aan de Noordzijde van honderd meter met bladverliezende bomen (Linde=*Tilla tomentosa*) en struiken (laurierkers,

Prunus laurocerasus) en bodembedekker braam. De tweede strook aan de zuidzijde bestaat uit drie rijen pijnbomen (*Pinus Sylvestris*).

Figuur b2

Locatie 1 detail A50
Valburg:



Figuur b3

Zicht kijkend naar het noorden op de oostzijde van meetlocatie perceel II met van links naar rechts de naaldbomen, de loofbomen, het vegetatieloze gedeelte ligt achter de fotograaf. Duidelijk zichtbaar is de aangebrachte aarde langs het talud van de snelweg en gele slangen voor de watervoorziening (Bron: [11])



Windklimaat:

Zie bijlage A