



Energy research Centre of the Netherlands

Vegetatie voor een betere luchtkwaliteit

Perceel 1: A50 Vaassen

A.T. Vermeulen

E.P. Weijers

E.W. Meijer

J.H. Duyzer

A.A. Pronk

Vegetatie voor een betere luchtkwaliteit

Prijsvraag "Meten is weten"

Perceel 1: A50 Vaassen

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

Ontwikkelingsrapport



Rapportnummer DVS-2008-026

Status: Definitief

Bedrijfsnaam: Combinatie ECN/TNO/PRI

Datum: maart 2008

Het innovatieprogramma Luchtkwaliteit (IPL) werkt in opdracht van de ministeries van Verkeer en Waterstaat en VROM aan innovatieve oplossingen die bijdragen aan verbetering van de luchtkwaliteit op en rond snelwegen. De focus ligt op snelwegen bij dichtbevolkte gebieden (zgn. "hot spots"). Daar zal bronbeleid pas op termijn toereikend zijn om de luchtkwaliteit wat betreft NO₂ en PM₁₀ aan de normen te laten voldoen. IPL-maatregelen kunnen onderwijl bijdragen aan verbetering. De Dienst Verkeer en Scheepvaart (DVS) van Rijkswaterstaat voert het IPL uit. Met het beschikbare onderzoeksbudget identificeert, selecteert, stimuleert en beproeft het IPL kansrijke ideeën voor oplossingen. Deze worden tot en met 2008 onderzocht en beproefd. Zodra een maatregel haalbaar blijkt, wordt daarover een positief advies afgegeven. Het IPL werkt samen met kennis- en onderzoeksinstituten, andere departementen, provincies, gemeenten en marktpartijen.

Colofon

- 1. Rapportnummer**
DVS-2008-026
- 2. Serienummer**
Versie A
- 3. Ontvanger catalogus nummer**
-
- 4. Titel en ondertitel**
Vegetatie langs wegen en Luchtkwaliteit;
Perceel I:A50 Vaassen
- 5. Datum rapport**
maart 2008
- 6. Code uitvoerende organisatie**
Combinatie ECN/TNO/PRI
- 7. Schrijver(s)**
A.T. Vermeulen
E.P. Weijers
E.W. Meijer
J.H. Duyzer
A.A. Pronk
- 8. Nummer rapport uitvoerende organisatie**
geen
- 9. Naam en adres opdrachtnemer**
ECN
Postbus 1
1755 ZG Petten
- 10. Projectnaam**
Vegetatie voor betere luchtkwaliteit
- 11. Contractnummer**
DWW-2945
- 12. Naam en adres opdrachtgever**
Rijkswaterstaat
DGP & VROM
- 13. Type rapport**
Ontwikkelingsrapport (ontwikkelingsfase)
- 14. Code andere opdrachtgever**
-
- 15. Opmerkingen**
Verspreiding: nvt
- 16. Trefwoorden**
IPL, fijnstof, stikstofoxide, verspreiding,
vegetatie, depositie, fotochemie
- 17. Referaat**
In deze rapportage wordt een uitwerking gegeven van het ingediende idee voor de prijsvraag "Vegetatie voor betere luchtkwaliteit". Het gaat hierbij om het nader kwantificeren van vegetatie-effecten op de niveaus van luchtverontreiniging, het modelleren van de waargenomen effecten en het voorspellen van de bijdrage die vegetatie kan leveren in de verbetering van de luchtkwaliteit. Daarnaast zal onderzocht worden of toepassing van vegetatie een kansrijke oplossing is voor de verbetering van de luchtkwaliteit. Uiteindelijke doel is om gevalideerde modelresultaten te gebruiken voor het ontwerpen van rekenregels voor luchtkwaliteit.
- 18. Aantal blz.**
46 (exclusief bijlagen)
- 19. Prijs**
-
- 20. Acceptatie projectleider**
A. van den Burg
- 21. Acceptatie programmamanager IPG**
Mevr. Ir. C. Kempenaar
- 22. Acceptatie afdelingshoofd IP**
Ir. G. Debeus
- 23. Acceptatie directeur Infrastructuur**
Drs. Ing. A. L. J. Sprangers

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



Inhoudsopgave

Vegetatie voor een betere luchtkwaliteit	1
Samenvatting	6
1. Inleiding	7
1.1 Achtergrond en idee	7
2. Analyse en oplossingsconcept	8
2.1 Probleembeschrijving	8
2.2 Doelstelling	9
2.3 Principe van de oplossing	10
2.4 Technische uitwerking	10
3. Onderbouwing van de oplossing	11
3.1 Waarom werkt vegetatie en hoe effectief is vegetatie in het verbeteren van luchtkwaliteit	11
3.2 Sterke en zwakke punten van de vegetatie bij het verbeteren van luchtkwaliteit	11
4. Kritische succesfactoren	12
4.1 Effectiviteit van vegetatie op vermindering concentraties	12
4.2 Invloed van vegetatie op de verspreiding	12
4.3 Aanpassen modelopzet PanAir voor onze vraagstelling	12
4.4 Praktische problemen bij buitenmetingen	13
5. Experimenteer- en monitorplan	14
5.1 Meetlocatie	14
5.2 Uitvoering experimenten	16
5.3 Meet- en monitoringsplan	16
6. Opzet modelexperimenten	23
6.1 Modelopzet PanAir	23
6.1. Modeloverzicht	23
6.2 Validatiestudies	24
6.3 Technische beschrijving	24
Meteorologisch Model	27
<i>Invoer</i> 27	
<i>Vegetatie Model</i>	29
<i>Turbulentie Modellen</i>	29
6.3 Opzet modelberekeningen	30
6.4 Verkeersemissies	31
6.5 Vergelijking met de metingen	31
6.6 Parametrisatie van het vegetatie effect	32
7. Offerte realisatie	33
8. Kwaliteitscontrole en -beheersing	34
9. Randvoorwaarden en risico's	35
10. Conclusies en aanbevelingen	36
11. Verklaring bereidheid tot realisatie	37
Bijlage A Basismodel voor opname van NO ₂	39
Bijlage B Validatie en illustratie van gebruik van Pan-Air	45
B.2 Voorbeeldberekening Lyon	45

Proloog

ECN, Luchtkwaliteit & Klimaatverandering,
Alex Vermeulen
Ernie Weijers

TNO, Bouw en Ondergrond
Jan Duyzer
Ernst Meijer

Plant Research International BV
Annette Pronk
Chris van Dijk



Voorwoord

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

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

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

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

Voor u ligt het ontwikkelingsrapport dat in het kader van perceel 1 is opgeleverd. Van de drie ingediende ideeën zijn er twee, door een onafhankelijke jury, genomineerd voor verdere uitwerking. De twee ontwikkelde ideeën zijn geschikt om in 2008 in proefprojecten te demonstreren, te monitoren en te rapporteren.

Het ontwikkel- en realisatietraject is uitgevoerd door marktpartijen en door deskundigen van de overheid getoetst op de afgesproken procedure en op de technische inhoud.

Voor perceel 1 betrof het de volgende personen:

Rijkswaterstaat DVS

Aad van den Burg
Theo Cornelissen
Paul Fortuin
ChirsJan Leermakers

Marktpartijen

ECN Luchtkwaliteit & Klimaatverandering
Alex Vermeulen
Ernie Weijers
Aline Kraai

Royal Haskoning
Leon Kok
Sander Pijlman

Rijkswaterstaat DON

Harry Otterman

TNO Bouw en Ondergrond

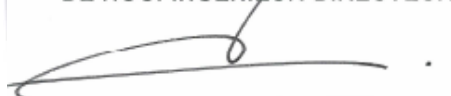
Jan Duyzer
Ernst Meijer

Plant Research International BV

Annette Pronk
Chris van Dijk

Samen is een flinke stap voorwaarts gezet bij deze vorm van publiek private samenwerking op het gebied van anticiperend onderzoek. Deze werkwijze kan in de toekomst vaker ingezet worden om onderzoeksvragen te beantwoorden.

RIJKSWATERSTAAT
DIENST VERKEER EN SCHEEPVAART
DE HOOFINGENIEUR-DIRECTEUR



drs. G.J.A. Al

Samenvatting

Het hier gepresenteerde ontwikkelingsrapport is geschreven door een Consortium van drie partijen. Het vormt de start van de gewenste kennisverwerving. Dit ontwikkelrapport omvat een nader uitgewerkte versie van het Plan van Aanpak voor de uitvoering van een experimentele campagne langs de A50 nabij Vaassen, het doen van modelberekeningen en het valideren van de modelsimulaties.

Gedurende twee campagnes van zes weken, een in de zomer van 2008 en een in de winter 2008/2009, zullen metingen aan de verspreiding van NO₂ en fijn stof plaatsvinden langs de A50 ter hoogte van Vaassen, langs twee transecten loodrecht op de weg. De A50 loopt hier van zuid naar noord. Een transect heeft een vegetatiestrook langs de oostzijde weg van ongeveer zes meter breed en zes meter hoog, het andere transect heeft vrije aanstroming.

Gezien de grootte van de te verwachten effecten is bij de opzet veel aandacht besteed aan het vermijden van systematische fouten bij de metingen van de verschillen en het kiezen van die parameters waaraan de te verwachten effecten het meest duidelijk zijn. Zo zal door het meten van deeltjesgrootteverdeling en –aantal duidelijk worden welke delen van het fijn stof al dan niet opgevangen worden door vegetatie, en welke invloed aan de vergrootte turbulentie door de obstakelwerking van vegetatie toe te schrijven is. Voor NO₂ is tevens belangrijk hoe de interactie tussen turbulentie en chemie met Ozon is.

De combinatie zal het model PanAir inzetten dat een gedetailleerde modelbeschrijving van het gewas en de invloed ervan op de stroming en deeltjesinvang mogelijk maakt en tevens een uitgebreide chemimodule bevat.

1. Inleiding

1.1 Achtergrond en idee

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

De gewenste uitbreiding van wetenschappelijke kennis dient te leiden tot:

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

Uiteindelijk is het streven gevalideerde modelresultaten te gebruiken voor het ontwerpen van rekenregels die vervolgens opgenomen moeten worden in het nationale Meet- en Rekenvoorschrift (MRV).

Het hier gepresenteerde ontwikkelingsrapport is geschreven door een Consortium van drie partijen. Het vormt de start van de gewenste kennisverwerving. Het bevat een plan als resultaat van de ontwikkelingsfase van het onderzoeksproject: 'Vegetatie voor een betere luchtkwaliteit' (de Idee-fase), Prijsvraag 'meten is weten' en beoogt 'het genereren van gevalideerde modelsimulaties die het effect van vegetatie op luchtkwaliteit zo goed mogelijk omschrijven op basis van luchtkwaliteitsmetingen op een proeflocatie te Vaassen (Perceel 1)'.

Dit ontwikkelrapport omvat een nader uitgewerkte versie van het Plan van Aanpak voor de uitvoering van een experimentele campagne langs de A50 nabij Vaassen, het doen van modelberekeningen en het valideren van de modelsimulaties.

Het meetexperiment is zo ontworpen dat het voldoet aan de modeleisen, d.w.z. de te meten grootheden en de experimentele opstelling zijn afgestemd op de benodigde invoerparameters van het toegepaste model. In het hier voorgestelde onderzoek zal gebruik gemaakt worden van het model Fluidyn-PanAir. Dit model staat ter beschikking van het consortium en biedt veel mogelijkheden om de berekeningen te koppelen aan de meetgegevens. Bovendien kunnen in de code eenvoudig en snel aanpassingen worden gedaan. Een verdere beschrijving volgt in Hoofdstuk 6 en Bijlagen A en B.

Voor dit ontwikkelingsrapport is gebruik gemaakt van het Kennisdocument 'Vegetatie-luchtkwaliteit ten behoeve van een pilotproject langs rijkswegen'. Hierin is geconcludeerd dat er al onderzoek is gedaan naar het effect van vegetatie op luchtkwaliteit maar dat het effect nog niet goed in bestaande luchtkwaliteitsmodellen is ingebouwd. Ook is kennis genomen van de resultaten beschreven in het rapport 'Onderzoek naar de luchtkwaliteit rondom een vegetatiestrook langs de snelweg' (ECN-E--07-011) waarin eerdere luchtkwaliteitsmetingen op Perceel 1 staan beschreven. Eén van de conclusies hierin was dat vegetatie kan leiden tot het wegvangen van fijn luchtstof maar dat dat niet noodzakelijkerwijs een verbetering geeft in vergelijking van een (verder identieke) situatie zonder vegetatie. Gevonden werd namelijk ook dat de aanwezigheid van vegetatie leidt tot een lagere windsnelheid, en dus een verminderde verdunning van de vervuilde lucht tot gevolg heeft.

2. Analyse en oplossingsconcept

2.1 Probleembeschrijving

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

Bekend is dat een vegetatiestrook op twee manieren de luchtkwaliteit in de onmiddellijke omgeving kan beïnvloeden:

a. een filterend effect, d.w.z. het afvangen van verontreinigende componenten waaronder fijn stof en stikstofdioxide. Gassen als NO_2 worden vooral via de huidmondjes van bladeren opgenomen. Loofbomen zijn daarin efficiënter dan coniferen. Gassen worden niet in gelijke mate geabsorbeerd. Zo wordt het wegvangen van CO door een vegetatie een factor 4 tot 10 lager ingeschat dan dat van NO_2 en fijn stof. Stof deponert op bladeren en andere plantendelen en wordt daarop (tijdelijk) vastgehouden (adsorptie). Coniferen doen dit weer beter dan loofbomen door hun grotere Leaf Area Index.

Eén en ander is echter minder eenvoudig dan het lijkt. Zo is te voorzien dat de mate van filtering verschillend zal zijn voor deeltjes met verschillende diameter. De deeltjes uit de grove fractie ($\text{PM}_{10-2.5}$) zullen eerder tegengehouden worden door de groenstrook dan de kleinere deeltjes in de massafractie $\text{PM}_{2.5}$ of de nog veel kleinere deeltjes uit de gezondheidsrelevante ultrafijne fractie ($\text{PM}_{0.1}$). Zowel onderzoek naar de veranderingen in de massaconcentraties (PM_{10} en $\text{PM}_{2.5}$) en de aanwezigheid van stofdeeltjes van verschillende grootte maakt deel uit van de studie.

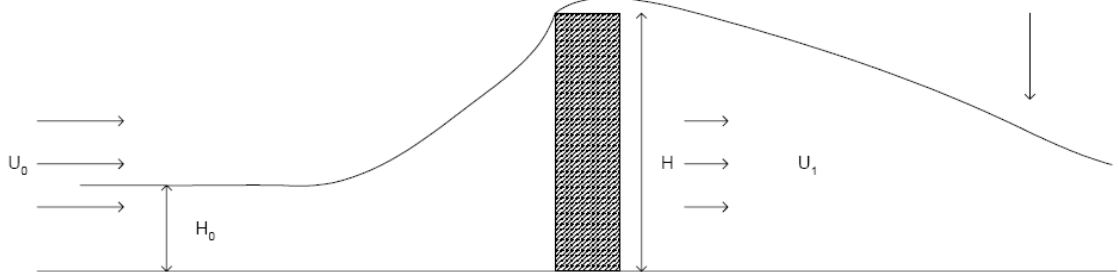
b. een opstuwend effect, d.w.z. de verhoging van de lokale terreinruwheid leidt tot een grotere initiële verdunning van de pluim van verontreiniging afkomstig van de weg dan in de situatie zonder een dergelijke strook. Als gevolg van de obstructie van de vegetatiestrook neemt de inkomende windsnelheid af voor en binnen de strook. Wegens behoud van massa ontstaat er een verticaal omhoog gerichte windcomponent en wordt een deel van de stroming over het groenelement gebogen. Direct achter de strook is sprake van een rustiger windklimaat met mogelijk even hoge of zelfs hogere concentraties bij een lij- of terugwervel; als er geen terugwervel is zal de concentratie lager zijn voor componenten die door de vegetatie in bepaalde mate opgenomen worden. Verder weg van het obstakel neemt de windsnelheid langzaam weer toe. Omdat een obstakel een lange golf van neerwaartse turbulentie achter het obstakel creëert, vindt inmenging van (mogelijk) schonere lucht van boven plaats. Hoe meer wind, des te verder deze turbulentie zich uitstrekt. De afname in concentratie varieert dus met de benedenwindse afstand achter de vegetatie.

Overigens, niet in alle opzichten heeft vegetatie een positief effect op luchtkwaliteit. Zo wordt wel beweerd dat door een betere menging en vertraging van de luchtstroom in de vegetatiezone NO meer gelegenheid heeft te reageren met het aanwezige ozon. Dit kan mogelijk leiden tot hogere NO_2 concentraties. Daarnaast zijn er stofdeeltjes en stofprecursoren die door vegetatie uitgestoten worden (bv. isopreen en terpenen van bossen).

In algemene zin wordt bij de modellering van bovenstaande processen uitgegaan van een strook met voldoende doorlaatbaarheid voor de luchtstroom om afdoend contact tussen lucht en het groen mogelijk te maken. Als gevolg van de aanwezigheid van deze poreuze vegetatiestrook (hoogte H) zal de inkomende snelheid (U_0) afnemen (zie tekening ¹). Dit leidt tot een lagere gemiddelde snelheid in en achter de strook (U_1). Deze afname is afhankelijk van de dichtheid van de strook en kan wel 50% bedragen. Indien de emissies dicht bij de strook plaatsvinden zodanig dat alle geëmitteerde stoffen grotendeels door de strook gaan zullen de concentraties achter de strook omhoog gaan (in vergelijking met de situatie zonder strook). Immers, dezelfde emissies worden met minder langsstromende lucht gemengd. Als in de vegetatiestrook depositie van verontreiniging plaatsvindt, zal de concentratie achter de strook afnemen. Het netto effect op de luchtkwaliteit direct achter de strook wordt dus bepaald zowel door depositie en snelheidsdemping.

¹ Uit: Wesseling et al. (2004), *Effecten van groenelementen op NO_2 en PM_{10} concentraties in de buitenlucht*, TNO-rapport R2004/383

Er zijn echter nog meer processen die de concentraties achter de strook beïnvloeden. Bij voldoende afstand tussen weg en vegetatiestrook zal een deel van de luchtstroming omhoog worden gestuwd bij nadering van de vegetatie (boven de strook is dan ook sprake van hogere snelheden). Een deel van de emissie zal dus in eerste instantie over het obstakel wordt geduwd wat de concentraties dicht achter de strook kan verlagen t.o.v. de ongestoorde situatie waar de emissies laag bij de grond zullen blijven. Een uitzondering op deze situatie is het optreden van een lijwervel direct achter de strook waarin stoffen na passage van het obstakel in opgenomen kunnen worden ('trapping') en leidt tot concentratieverhoging.



Bij voldoende doorlaatbaarheid van de vegetatie is dit echter niet waarschijnlijk. Voorbij de strook vindt vervolgens inmenging plaats van lucht die over het obstakel heen is geduwd en die bovendien vermengd is geraakt met bovenliggende (schonere) lucht door de toegenomen turbulentie. Verder weg van het obstakel (ca. 10 maal de obstakelhoogte) zal het oorspronkelijke inkomende windveld hersteld zijn.

2.2 Doelstelling

Binnen dit onderzoek zijn drie onderzoeksdoelen te onderscheiden:

1. Karakterisering van de eigenschappen van vegetatiestrook op de proeflocatie te Vaassen.
2. Verkrijgen van inzicht in de effecten van een vegetatiestrook langs een weg op de luchtkwaliteit in het benedenwindse terrein waarbij de hierboven genoemde effecten beide kwantitatief worden getoond. Het experimentele werk richt zich hierbij op het verkrijgen van een set van meetwaarden van de voor regelgeving relevante stoffen. Belangwekkende vragen in deze zijn vervolgens:
 - a. Wat zijn de concentraties van gassen en stofdeeltjes op diverse plaatsen voor en achter de vegetatiestrook?
 - b. Hoe verhouden deze zich tot de concentraties in het referentiegebied zonder vegetatiestrook?
 - c. Hoe verhoudt het effect van 'filtering' zich ten opzichte van het effect van de extra turbulentie?
 - d. Welke invloed hebben de eigenschappen van de vegetatie hierop?
3. Het verkrijgen van een gedetailleerd model voor de situatie op de proeflocatie. Het model is gebaseerd op een uitgebreide technische analyse waarin locatiespecifieke eigenschappen zijn meegenomen. Het model wordt gebruikt om een aantal simulaties door te rekenen aan de hand van de verkregen datasets. Naar aanleiding van de resultaten van deze validaties vindt verdere ontwikkeling plaats zodat het model de invloed van de op de proeflocatie aanwezige vegetatie op de luchtkwaliteit zo goed mogelijk kan voorspellen

Opgemerkt dient te worden dat er nog geen gevalideerde modellen beschikbaar zijn om de invloed van vegetatiestroken op de luchtkwaliteit langs wegen te berekenen. Er is daarom behoefte aan meetwaarden verzameld onder verschillende (meteorologische) omstandigheden waarmee het hier toegepaste (en later ook andere) modellen kunnen worden verbeterd en gevalideerd. In de huidige praktijk toegepaste verkeersmodellen als CAR, TNO-VM, VLW en in de met verkeersmodules uitgebreide KEMA versie van het NNM (KEMA-VM NNM+) wordt de invloed van bomen langs de weg meegenomen in een zogenaamde bomenfactor. Deze leidt tot hogere berekende concentraties tussen de weg en de bomenrij en een lagere concentratie op enige afstand benedenwinds van de weg en de bomenrij. Het hier voorgestelde experiment en de uit te voeren modelsimulaties dienen de gehanteerde modelparametrisatie te verbeteren.

2.3 Principe van de oplossing

Het onderzoek is er op gericht de bovengenoemde doelstellingen te bereiken. Voor een aantal onderdelen is de voorgestelde aanpak vrij klassiek. Een aantal specifieke onderdelen is echter meer bijzonder en van belang:

- Het uitvoeren van verschildmetingen zal plaatsvinden met een enkele monitor die door middel van een kleppensysteem lucht van verschillende posities (bijvoorbeeld voor en achter de vegetatie) aanzuigt. Hierdoor wordt het effect van bekende problemen zoals verlopende calibraties en verschillende offset van monitoren vrijwel weggenomen.
- Het effect van opname door de vegetatie versus het effect van meer of minder verdunning door de aanwezigheid van vegetatie wordt onderzocht door het meten van de verspreiding van een relatief inert gas (te denken valt aan koolmonoxide (CO) als verkeersindicator).
- Het meten van fijn stof concentraties is complex. Daarbij is naar verwachting het effect van de deeltjesdiameter op de afvangst door vegetatie belangrijk. Het is daarom zinvol om de afvangst in afhankelijkheid van de deeltjesdiameter te onderzoeken. Dit is in de huidige meetopzet voorzien. Daarnaast zullen ter vergelijking (en calibratie van de meetinstrumenten) metingen met de standaard fijn stof referentie methoden worden uitgevoerd. Verder is het van belang dat het door het consortium te gebruiken model het mogelijk maakt de verspreiding van fijn stof in afhankelijkheid van de deeltjesdiameter te berekenen.

2.4 Technische uitwerking

Voor een gedetailleerde beschrijving van de meetopzet en de modelleringsactiviteiten wordt verwezen naar hoofdstuk 5

3. Onderbouwing van de oplossing

3.1 Waarom werkt vegetatie en hoe effectief is vegetatie in het verbeteren van luchtkwaliteit

Deze vraag is de centrale vraag in het onderhavige onderzoek. Zoals in hoofdstuk 2 vastgesteld is het effect van vegetatie langs de snelweg in potentie positief, maar afhankelijk van de precieze condities kan dit meer of minder goed uitvallen. Door een redelijk representatieve locatie te kiezen die voldoet aan de eisen voor een reproduceerbaar en interpreteerbaar meetresultaat en koppeling van de resultaten aan een gedetailleerd verspreidingsmodel zal dit onderzoek resultaten in meer algemene zin kunnen opleveren op basis van de set van unieke invoergegevens.

3.2 Sterke en zwakke punten van de vegetatie bij het verbeteren van luchtkwaliteit

Vegetatie is een levend object en is dus onderhavig aan fluctuaties door natuurlijke oorzaken of andere verstoring. Klimaatverandering is daarbij een van de bedreigingen van de toekomst. Grote droogte, hogere temperaturen of juist grote regenval in de winter, en plagen van insecten hebben negatieve effecten op endemische soorten zoals toegepast in de huidige vegetatie houtwallen langs snelwegen. Ook is het niet onmogelijk dat de niveaus van vervuiling langs een snelweg na opname door de vegetatie op een gegeven moment tot vermindering van de gezondheidstoestand van de vegetatie leiden. Al deze factoren vallen buiten het beoordelingskader van deze studie.

Een sterk punt van de benaderingswijze is dat een unieke situatie uit de praktijk gekoppeld wordt aan modelsimulaties, zodat de gegevens verkregen uit dit onderzoek breder toegepast kunnen worden op andere situaties na calibratie van het gekozen model met de uit het model verkregen resultaten. Het model kan dan tevens toegepast worden om te komen tot versimpelde parametrisaties die toegepast kunnen worden in de gebruikelijke transportmodellen zoals Pluim Verkeer en ISL2.

4. Kritische succesfactoren

4.1 Effectiviteit van vegetatie op vermindering concentraties

De effectiviteit van de vegetatie op het verminderen van de concentraties hangt samen met de samenstellingen van de vegetatie en met de structuurkenmerken van de vegetatie.

De samenstelling.

Onder de samenstelling worden de gewassen in de vegetatie verstaan. De gewassamenstelling heeft invloed op de effectiviteit van het verminderen van concentraties. Sommige gewassen zijn door hun eigenschappen beter geschikt voor het verminderen van gasvormige componenten terwijl andere gewassen beter geschikt zijn voor het wegvangen van fijn stof. Gewassen met brede, dunne bladeren met veel huidmondjes zijn bij uitstek geschikt voor het opnemen van gasvormige componenten, zoals b.v. NO₂ (Tonneijck & Blom-Zandstra 2002). Dit zijn in het algemeen loofbomen. Voor NO₂ geldt bijvoorbeeld, dat de hoeveelheid die kan worden opgenomen, sterk samen hangt met de hoeveelheid bladoppervlak per volume eenheid. Meer blad neemt meer op (Okano et al. 1988). De huidmondjesweerstand is eveneens belangrijk; hoe lager de weerstand hoe groter de opname. Gewassen met een groot oppervlak tot volume ratio, veel takken en twijgen en de aanwezigheid van ruwe of harige oppervlaktestructuren zijn gunstig voor het wegvangen van fijn stof (Smith & Staskawicz 1977). Dunne, lancetvormige structuren zoals naalden voldoen hieraan en naaldbomen zijn daardoor bij uitstek geschikt voor het verminderen van de concentraties fijn stof.

De structuurkenmerken.

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

4.2 Invloed van vegetatie op de verspreiding

De invloed van vegetatie op de verspreiding is gedetailleerd beschreven in hoofdstuk 2 bij de probleemstelling. Positieve effecten zullen optreden door het filterend effect en door het opstuwend effect. Echter snelheidsdemping en mogelijke efficiëntere inmenging van achtergrond ozon kunnen een negatief effect bewerkstelligen. Dit onderzoek beoogt dit te bepalen. Met de modelberekeningen kunnen de diverse deelprocessen afzonderlijk gekwantificeerd worden.

4.3 Aanpassen modelopzet PanAir voor onze vraagstelling

Het model PanAir is generiek en door de gebruiker naar behoefte aan te passen en in te stellen. Er zijn geen modificaties in de generieke code voorzien.

Randvoorwaarden en beginvoorwaarden voor het model worden door de metingen gegeven (windsnelheid, richting, achtergrond concentraties e.d.).

Broninstellingen voor verkeer zijn conform de Nederlandse regelgeving. De standaard emissiefactoren zullen vervangen worden door de VERSIT+ emissiefactoren. Benodigde invoer zijn de verkeersintensiteiten van uur tot uur voor personenauto's en zwaar en middelzwaar vrachtverkeer.

De vegetatiemodule is geschikt om gemeten Leaf Area Densities op te geven waarmee de effecten op de stroming en het filterend effect door PanAir worden berekend. De droge depositie in PanAir wordt in dit project aangevuld met een gedetailleerd depositiemodel dat op basis van de plantfysiologie de depositieparameters geeft als input voor PanAir. De door PanAir berekende grootschalige waarden (temperatuur, vocht, zonnestraling) kunnen vervolgens weer binnen het depositiemodel gebruikt worden.

4.4 Praktische problemen bij buitenmetingen

Natuurlijk is het succes en de bruikbaarheid van de meetcampagnes afhankelijk van de meteorologische condities tijdens de metingen. De metingen zijn alleen te gebruiken met windrichtingen tussen Zuidwest en Noordwest en windsnelheden boven de 1 m/s. Bij lagere windsnelheden is modellering niet mogelijk omdat dan zeker niet voldaan wordt aan het criterium van stationariteit van de turbulente uitwisselingsprocessen. Normaal gesproken is hierin ongeveer 25% van de tijd over een heel jaar voldaan. Het is echter goed mogelijk dat in een periode van 6 weken een aanzienlijk kleiner of groter percentage voorkomt waarin aan deze voorwaarden wordt voldaan.

Voor de metingen is natuurlijk van groot belang dat toestemming en medewerking van de landeigenaren en wegbeheerder verkregen wordt en blijft. Vooralsnog worden op dit gebied geen problemen verwacht. Ook zijn mogelijk formele toestemmingen e/of vergunningen vereist voor het uitvoeren van de experimenten. Dat zal allemaal op korte termijn uitgezocht gaan worden in de ontwikkelingsfase.

Voor de interpretatie van de meetgegevens zijn goede verkeerstellingen absoluut noodzakelijk. Wij gaan er van uit dat RWS ons tijdig van deze gegevens over de meetperiodes kan voorzien.

5. Experimenteer- en monitorplan

5.1 Meetlocatie



Figure 5-1 Meetlocatie langs de A50 nabij Vaassen: referentielij (hectometerpaal 216.5) en vegetatielij (hectometerpaal tussen 216.8 en 216.9)



Figure 5-2 Beeld van de vegetatiestrook op de meetlocatie in de zomer, gezien vanaf de vluchtstrook aan de rechterkant, kijken naar het noorden.

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

In figuur 5-1 is een luchtfoto van de meetlocatie te zien met daarin aangegeven de positie van twee lijnen waarlangs metingen met en zonder invloed van de vegetatie gedaan kunnen worden. Er is sprake van een deel langs de snelweg waarlangs géén vegetatie aanwezig is en dat daarom geschikt is voor het doen van de zgn. 'referentiemetingen'; de plaats van deze metingen wordt hier wel 'referentiemeetlijn' genoemd. Aansluitend (in noordelijke richting) is een gedeelte mét een vegetatiestrook voor het doen van de metingen die beïnvloed zullen zijn door de aanwezigheid van vegetatie; dit wordt aangeduid met 'vegetatiemeetlijn'. Afgezien van de aanwezigheid van de vegetatiestrook zijn er verder geen substantiële omgevingsverschillen die een andere verspreiding van de verkeersemissies tot gevolg hebben. Het grote voordeel van deze locatie is dan ook dat gelijktijdige metingen mogelijk zijn van enerzijds de verspreiding en turbulentie in een ongestoorde ('normale') situatie en in een situatie waarin deze parameters beïnvloed worden door de aanwezigheid van vegetatie. Bijkomend voordeel is dat er geen dominante (industriële) emissiebronnen zijn in de directe omgeving die de metingen verstoren.



Figure 5-5-3 Beeld van de vegetatiestrook op de meetlocatie in 'winterkleed' gezien vanaf de oostzijde van de snelweg A50, kijkend richting noord-west.

5.2 Uitvoering experimenten

Zoals vermeld in de vraagspecificatie dienen twee meetcampagnes plaats te vinden. Deze vormen onderdeel van de meet- en validatiefase. Deze fase start in april 2008 en duurt tot en met februari 2009. De eerste campagne zal plaatsvinden in de zomer van 2008. De wintermetingen zijn gepland in de periode december 2008 – februari 2009.

5.3 Meet- en monitoringsplan

De experimentele meetopzet is gemotiveerd door de beschrijving van optredende fysische en chemische processen opgenomen in het eerder beschreven model. De randvoorwaarden van het model leggen aan de meetcampagne dus een aantal eisen op. Er zijn vijf categorieën meetparameters te onderscheiden die gemeten moeten worden:

- geometrie
- bronsterkte
- meteorologie
- vegetatie
- luchtkwaliteit

Per categorie wordt nu ingegaan op deze parameters.

Geometrie

Voor wat de locatie betreft worden de volgende eigenschappen ter plaatse van de proeflocatie omschreven zoals die nodig zijn voor de modellering:

- precieze locatie
- wegrichting (oriëntatie)
- wegbreedte (breedte per rijbaan, totale breedte)

- bermbreedtes (incl. middenberm en vluchtstrook)
- eventuele verhoogde of verdiepte ligging
- afstand tot vegetatiestrook

De beschrijving van de wegdoorsnede wordt als invoer opgenomen in het model. Voor de precieze afmetingen zullen zonodig en in overleg met Rijkswaterstaat Directie Oost metingen plaatsvinden waaronder dit deel van de A50 valt.

Bronsterkte

De emissie door het wegverkeer ten tijde van de uitvoering van de metingen zal op basis van de volgende gegevens worden bepaald:

- verkeersstroom in voertuigen per uur tijdens meetperiode,
- onderverdeling in personenwagens, lichte vrachtwagens en zware vrachtwagens tijdens meetperiode,
- emissiefactoren.

De bovenstaande gegevens zullen worden gecombineerd met emissiefactoren uitgedrukt in g/voertuigkilometer. Hiervoor zullen de formele emissiefactoren voor de meetperiode gebruikt 2007/2008 (BGE scenario)

Gegevens als deze kunnen verkregen worden van de intranet site www.verkeersgegevens.nl of www.dataportal.nl. Andere informatiebronnen zijn Rijkswaterstaat, Dienst Verkeer en Scheepvaart en Dienst Oost-Nederland. In het verleden hebben partijen uit het Consortium reeds vele malen met deze instanties contact gehad en de diverse ingangen zijn bekend.

Meteorologie

Duidelijk is op basis van bovenstaande dat het bepalen van horizontale én verticale windgradiënten noodzakelijk is voor het uiteenrafelen van de beschreven processen.

Ter bepaling van verticale windprofielen zal op verschillende hoogtes (leefhoogte, halverwege en aan de oostzijde boven de kruin) ter weerszijden van de vegetatiestrook de windvector geregistreerd worden om de luchtstromingen die door en over de vegetatiestrook bewegen te kunnen onderscheiden. Ook is het de bedoeling 1 sonische anemometer te plaatsen in de meetmast aan de oostzijde van de vegetatie. Met behulp van geavanceerde windmeters (sonische anemometers) zullen metingen van de horizontale en verticale (turbulente) componenten van de windvector (en temperatuur) uitgevoerd worden. Deze apparatuur wordt veelvuldig gebruikt in meteorologische experimenten en met betrekking tot windmetingen is er, voor zover ons bekend, geen nauwkeuriger apparatuur beschikbaar. Het Consortium heeft volgend jaar zomer 5 van dergelijke instrumenten (5 Gill anemometer R2/R3/WMPPro) ter beschikking.

Achter de strook (op de voorgeschreven afstanden) zal de windsnelheid gemeten worden op leefhoogte met Mierij windsensoren (type: MMW005).

Er wordt hier onderscheid gemaakt tussen de bovenwindse (west van de A50; achtergrond) en benedenwindse (oost van de A50) metingen. Benedenwinds worden twee meetlijnen onderscheiden: de vegetatiemeetlijn en referentiemeetlijn:

- vóór de vegetatie is dit op drie m afstand van de wegrand, dit is vlak voor de vegetatie. Een andere plek is niet mogelijk vanwege de beperkte ruimte tussen weg en vegetatie (3-4 m). Achter het groenelement op ongeveer 10 m, en op 25 m en 85 m van de vegetatie. De meethoogtes voor en achter de vegetatie zijn 2, 6 en ten oosten van de vegetatie ook 12 m (boven de top van de vegetatie). Het is de bedoeling om de metingen op 6 meter hoogte uit te voeren met sonische anemometers. Op de overige punten worden windsnelheid en -richting gemeten met de Mierij Windsensor.
- de metingen zonder vegetatie vinden plaats op dezelfde afstanden van de wegrand. De meethoogtes zijn 2 m. Op 3 m afstand van de weg gebeurt dit eveneens met een sonische anemometer op 6 meter hoogte. Dit om de invloed van het verkeer op het turbulentiepatroon te registreren (middels vergelijking met de sonische waarneming bovenwinds). Op de overige afstanden geschieden de windmetingen met de Mierij Windsensor.

Bovenwinds

De volgende variabelen worden bovenwinds gemeten ten behoeve van de 'achtergrondmeting':

- windsnelheid en windrichting op 2 m hoogte

- temperatuur op 2 m hoogte
- relatieve vochtigheid
- neerslag
- turbulente kinetische energie

Benedenwinds

De volgende variabelen worden gemeten op het benedenwindse deel:

- windsnelheid en windrichting
- temperatuur
- turbulente kinetische energie

Instrumentatie

De sonische anemometer meet met hoge tijdsresolutie (20 Hz) en gevoeligheid (< 5 cm/s) horizontale en verticale windsnelheidscomponenten evenals luchttemperatuur. Op deze wijze zijn betrouwbare 15-min gemiddelde metingen mogelijk van horizontale en verticale windsnelheidscomponent (U,V,W) evenals temperatuur (T), turbulente componenten (u' , v' en w' , T'), impuls- en warmtefluxen en atmosferische stabiliteit (Monin-Obukhovlengte). Uit deze gegevens kan (o.a) de turbulente kinetische energie (TKE) berekend worden. De nauwkeurigheid is $\pm 0,1$ m/s en $\pm 3^\circ$. Een ander voordeel van de sonische anemometer is dat deze ook nauwkeurig kan meten bij lage windsnelheden (<0.5 m/s). De Mierij (Solid State Windsensor) registreert de horizontale windsnelheid en -richting. De nauwkeurigheid van dit apparaat is minimaal $\pm 0,5$ m/s of $\pm 5\%$ (bij 20°C); de nauwkeurigheid van de windrichting is $\pm 3^\circ$ (bij 20°C). Meetwaarden beneden de 0,5 m/s zijn onbetrouwbaar.

De relatieve vochtigheid wordt gemeten met vochtmeter Rhotronics Sensor model 263T van Mierij. De nauwkeurigheid wordt geschat op $\pm 5\%$ (bij 23°C). Door zelf een ventilatiesysteem aan te brengen in het sensordeel is deze nauwkeurigheid beter dan 5%. Hiervan zijn er twee tot vier beschikbaar.

Bewolgingsgraad en neerslag kunnen worden opgevraagd bij het KNMI voor nabijgelegen stations (zoals Deelen). Straling wordt gemeten met de CNR1 van Kipp&Zn (kortgolvig en langgolvig).

Bodemvocht is een belangrijke parameter. Het heeft effect op de verdamping van bomen, bij verdamping staan de huidmondjes open en kan ook NO_x of andere gassen de huidmondjes in en H₂O eruit. Bij een lage vochtbeschikbaarheid gaan de huidmondjes dicht en stopt de gasuitwisseling, en daarmee ook de opname van NO_x. Tevens is het zo dat bij voldoende vochtbeschikbaarheid de opnamecapaciteit van de bomen te laag kan zijn en dus ook de huidmondjes dicht gaan. Ter beschikking staan Delta-T WET Sensoren, die bodemvocht meten en op een datalogger kunnen worden aangesloten. Calibratie geschiedt door een keer grondmonsters te drogen en met de metingen te vergelijken. De meters werken op basis van volumetrisch vochtgehalte. De bodemtemperatuur wordt eveneens gemeten. Tevens kan een pF-curve van de grond bepaald worden.

Een schematisch overzicht van de continue meetopstelling is gegeven in figuur 5-4.

Vegetatie

Voor het goed karakteriseren van de vegetatie zijn de volgende aspecten van belang:

1. Situering (afstand tot de weg; ruweidslengte)
2. Kwaliteiten van de groenstructuur (breedte, hoogte, doorsnedeprofiel, porositeit, soortenverdeling en seizoenskarakteristieken)
3. Kwaliteiten van de beplanting (bladoppervlak, plantfysiologische karakteristieken zoals huidmondjes, waslaag, bladreflectie, opnamekarakteristieken t.a.v. fijn stof en NO_x)

Situering

De afstand van het groenelement tot de weg wordt gemeten. De ruweidslengte wordt berekend op basis van de aangetroffen vegetatie tussen de weg en het groene element.

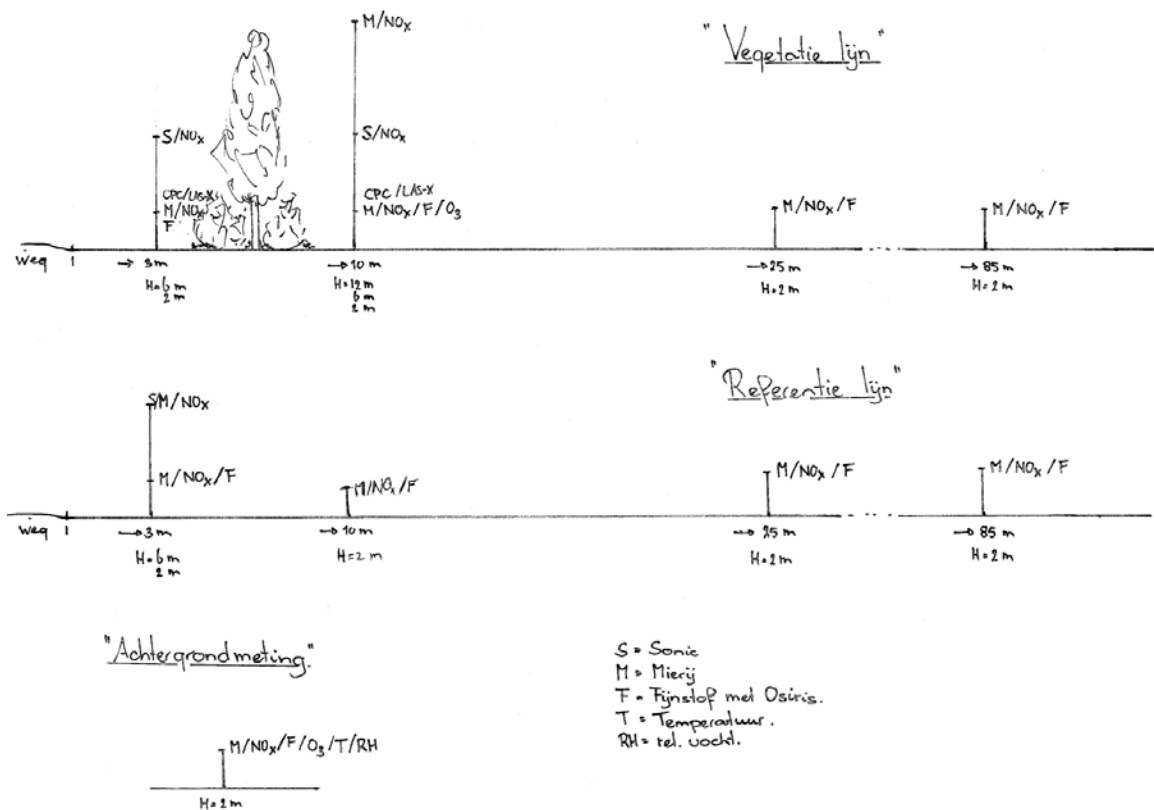


Figure 5-4 Schematisch overzicht van de permanente meetopstelling

Kwaliteiten van de groenstructuur

Van de vegetatie wordt een nauwkeurige veldbeschrijving gemaakt. Hierin worden de gewassen op hoofdsort benoemd, inclusief de Latijnse benaming. Bij deze veldbeschrijving wordt de kroonumfang in beeld gebracht, de hoogte van het gewas, de breedte van de vegetatie, een gezondheidsbeoordeling en een beoordeling van de groei. De beschrijving heeft een resolutie van maximaal 1 meter. Op grond van deze veldbeschrijving wordt duidelijk hoe homogeen of heterogeen die zijde van de groene vegetatie is, waar de vervuilde luchtstroom het gewas binnen dringt. Vanuit de literatuur zal voor de loofbomen aangegeven worden gedurende welke periode ze volledig in blad staan.

De (optische) porositeit wordt bepaald door met beeldanalyse de open vlakken in de vegetatie te meten (Löffler et al, 1977). Dit wordt eveneens aan het begin van iedere meetsessie uitgevoerd. Foto's van het vooraanzicht van de vegetatie worden geanalyseerd met een aangepaste versie van het beeldverwerkingsprogramma ImageJ (voor meer info hierover zie: www.rsbl.info.nih.gov).

Kwaliteiten van de beplanting

Aan het begin van iedere meetsessie wordt de bladbezetting (Leaf Area Density, LAD) op diverse hoogtes in de vegetatie bepaald. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een lichtmeter voor het fotosynthetische licht (400-700 nm, LICOR, model LI-190SA; Lincoln USA). Aan de hand van de veldbeschrijving wordt de vegetatie onderverdeeld in horizontale lagen waarbinnen de bladeren en stengels en takken homogeen verdeeld verondersteld worden. Voor iedere laag wordt de lichtonderschepping bepaald. Daarna wordt de LAI voor de betreffende laag berekend volgens Goudriaan (1992). De metingen worden uitgevoerd op een egaal bewolkte dag en vergeleken met het gemeten lichtniveau buiten de vegetatie. In geval van de wintervegetatie zal de stem area density van de kale takken van het aanwezige loofhout worden bepaald op dezelfde wijze als voor de vegetatie in blad. De maximale waarde voor de stem area density wordt geschat op 1 (Wesseling et al. 2004). Aan het einde van iedere meetsessie wordt een schatting gemaakt van de veranderingen in LAD. In de rapportage wordt de LAD per hoogte gekoppeld aan het vegetatietype op die hoogte.

Via literatuuronderzoek worden de plantfysiologische karakteristieken verworven, zoals het model die vraagt. Het gaat hierbij om de beharing van het blad, de waslaag, het aantal huidmondjes per bladoppervlak en de opname karakteristieken t.a.v. PM10, PM2,5 en NOx. Indien onvoldoende uit de literatuur bekend is, worden deze karakteristieken geschat met expert judgement. Standaard waarden worden aangehouden voor de reflectie van

kortgolvlige straling door bladmassa, omdat reflectie van zichtbaar licht doorgaans laag is (Goudriaan, 1994). Alle overige voor het model benodigde parameters worden via literatuur verkregen.

De invloed van het bermgras wordt niet verder onderzocht, in dit project wordt alleen naar het verschil tussen wel en geen andere bermvegetatie.

Alle luchtkwaliteitsmetingen kunnen worden geëvalueerd met de modelberekeningen door vergelijking van gemeten en berekende waarden. Alle overige metingen van wind, turbulentie en gewasparameters zullen gebruikt worden als invoer voor het zo goed mogelijk aanpassen van de modelparameters aan de omstandigheden van de metingen.

Luchtkwaliteitsmetingen

De volgende componenten worden gemeten op Perceel 1:

- NO, NO₂ (som is NO_x)
- fijn stof (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, aantallen deeltjes, deeltjesgrootte)
- O₃

De concentratiemetingen vinden plaats op een hoogte van 1.5 m conform het Meet- en Rekenvoorschrift Luchtkwaliteit. Aanvullende metingen worden uitgevoerd op andere hoogtes. Plaats en hoogte van deze concentratiemetingen vallen samen met de meteorologische waarnemingen:

- Achtergrondmeting (PM, NO_x, O₃): op minimaal 100 m ten westen van de snelweg op 1,5 m hoogte. De resultaten van deze metingen worden ten tijde van beide campagnes vergeleken met de uurlijkse meetgegevens van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit (RIVM) voor regionale stations in de omgeving van Perceel 1; dit zijn: Hellendoorn (stationsnummer 807), Barsbeek (818), Biddinghuizen (631) en Wekerom (738). Op deze stations zijn gedurende korte tijd na de metingen ongevalideerde uurlijkse gegevens beschikbaar voor NO en NO₂, ozon en PM₁₀². Na afloop van de periode kunnen gevalideerde gegevens opgevraagd worden, hetgeen zeker enkele maanden vergt.
- Vegetatielij (PM₁₀, PM_{2.5}, NO, NO₂, O₃, aantallen deeltjes, deeltjesgrootte, chemische samenstelling): Tussen weg en vóór de groenstructuur op 3 m van de wegrand: naast de meting op 1,5 m wordt hier ook op een hoogte van 6 m gemeten³. Achter de groenstructuur (10 m van de vegetatierand) op dezelfde hoogtes als voor de strook, en verder oostelijk van de snelweg op 25 en 85 m vanaf de rand van de groenstructuur op een hoogte 1,5 m. Ozon wordt gemeten in de vegetatiestrook.
- Referentielijn: de meetpunten zijn 3 m van de wegrand, en op 10, 25, en 85 m van de vegetatierand. Opstelling en componenten zijn verder gelijk aan die van de vegetatielij. Het meetresultaat langs deze meetlijn wordt gebruikt ter vergelijking met de metingen rondom de groenstructuur.

Alle metingen met uitzondering van de deeltjesmetingen worden continu in de tijd uitgevoerd. De tijdsresolutie bedraagt minimaal 1 uur. In de beschrijving van de apparatuur per component wordt hier nader op ingegaan. De verschillende datastromen voor meteorologie en luchtkwaliteit (achtergrond, vegetatielij, referentielijn) worden dagelijks (op afstand) bemonsterd zodat in geval van storing ingegrepen kan worden.

Voor de metingen op de verschillende meetpunten worden voor elke component (vrijwel) identieke instrumenten ingezet. De reden is de beïnvloeding van resultaten door verschillen in instrumentatie zoveel mogelijk uit te sluiten. Om dezelfde reden wordt voor de gasmetingen (NO, NO₂, CO₂) alle meetpunten op 1 lijn sequentieel bemonsterd met 1 apparaat. Via een softwarematig aangestuurd kleppensysteem wordt overgeschakeld van het ene meetpunt naar het andere.

De te verwachten verschillen in (gas-)concentraties voor en achter de vegetatie, met de hoogte en met de afstand kunnen vrij gering zijn, in de orde van grootte van slechts enkele procenten van de gemiddelde waarde. Om deze verschillen toch voldoende nauwkeurig te kunnen bepalen is het noodzakelijk om deze te bepalen met één sensor per

² Tevens is er gedurende beide campagnes voor station Hellendoorn de beschikking over PM_{2.5} dagconcentraties en chemische samenstelling voor PM₁₀ en PM_{2.5} (eveneens dagwaardes) die verzameld worden gedurende de meetactiviteiten in het kader van het Beleidsgeoriënteerd Onderzoeksprogramma Fijn Stof (BOP).

³ Zoals eerder aangegeven is meten op grotere hoogte niet zonder technische aanpassingen te realiseren.

component, om systematische verschillen tussen monitoren onderling te kunnen uitsluiten. Deze systematische verschillen bedragen zelfs voor uitzonderlijk goed gekalibreerde systemen namelijk makkelijk enkele procenten, en zijn dus van dezelfde orde van grootte. Bijkomend voordeel is dat met minder meetapparatuur kan worden volstaan (en dus lagere kosten) en dat ook minder obstructie van de stroming in het veld plaatsvindt door de apparatuur.

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 10 monsterpunten bediend worden. Alle leidingen zijn even lang en worden continu gespoeld waardoor omzettingen in de leiding bij stilstand niet plaats vinden. Steeds wordt de lucht van één monsterpunt via het kleppensysteem door de gasmonitoren geleid. De gebruikte apparatuur heeft aan twee minuten meting voldoende, een minuut is voor het spoelen en bereiken van de stabiele eindconcentratie, in de tweede minuut wordt de concentratie bepaald als gemiddelde en standaardafwijking van de monitorwaarden. Afhankelijk van het aantal monsterpunten kan een volledige meetcyclus in 10-20 minuten voltooid worden, zodat 3-6 volledige gradiëntmetingen per uur kunnen plaatsvinden, en een goede indruk van de variabiliteit van de concentratie binnen het uur verkregen wordt. Alle inlaten zullen zijn 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 is het mogelijk kruiselings gelijktijdig buitenlucht te bemonsteren vanaf een centraal punt voor de beide opstellingen (voor referentiemeetlijn én vegetatiemeetlijn). Gedurende de meetcampagne worden dagelijks vanaf deze gemeenschappelijke inlaat vergelijkingsmetingen uitgevoerd om eventuele offsets tussen beide monitoren te kunnen bepalen. Tijdens de campagne is dit hooguit 1 uur teneinde de continuïteit in de metingen zo min mogelijk te verstoren. De duur van de vergelijkingen voor en na de campagne is ongeveer 1 dag. Op deze wijze kunnen eventuele verschillen (offset, drift) worden gecorrigeerd door een verbeterde technische instelling of na afloop in de dataverwerking door middel van correctiefactoren.

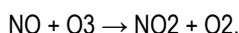
Zoals gebruikelijk bij experimenten als deze wordt vooraf en na afloop alle apparatuur tevens gecalibreerd in het laboratorium. Daarbij wordt waar mogelijk gebruik gemaakt van primaire standaarden zoals permeatiebuizen met een bekende afgifte, en standaard cilinders.

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

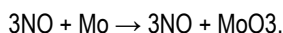
Instrumentatie

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 chemoluminescentie¹⁰. Het meetbereik van het instrument is 0-100 ppm. De analyzer is uitgerust met twee kanalen en twee afzonderlijke reactiekamers zodat gelijktijdige metingen van NO en NO_x (NO+NO₂) mogelijk zijn. De NO₂ concentratie wordt berekend door de laatste twee van elkaar af te trekken. NO reageert met ozon (O₃) dat zich in het instrument bevindt:



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



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

O₃

Gebruik zal worden gemaakt van monitoren gebaseerd op UV adsorptie dan wel chemoluminescentie. Een voorbeeld is de Monitor Labs (8810). De monitoren worden gekalibreerd met behulp van gas fase titratie in een laboratorium. De

nauwkeurigheid van de monitoren (afhankelijk van het type) zal enkele ppb's bedragen. De meting van ozon in dit project is overigens niet kwaliteitsbepalend.

Fijn stof

Fijn stof wordt gemeten door een combinatie van verschillende instrumenten. Allereerst zullen zogenaamde Osiris monitoren ingezet worden. In totaal zullen 6-10 van deze instrumenten ingezet worden: bovenwinds (leefhoogte), ter weerszijden van de vegetatie (op leefhoogte en hoger), op 25 en 85 m (leefhoogte), en op de referentiemeetlijn (3, 10, 25 en 85m, leefhoogte). Vanwege de beschikbare hoeveelheid Osiris is een andere positionering zeker mogelijk als dit wenselijk blijkt. De Osiris zuigt buitenlucht aan, via een verwarmde inlaat zonder voorafscheiding van een bepaalde deeltjesfractie. Het werkt volgens een optisch meetprincipe, waarbij lichtverstrooiing van een deeltje een maat is voor de grootte van het deeltje. De aantallen deeltjes in een grootteklasse worden geteld (PM10, PM2.5). 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.

Osiris monitoren meten met een ander principe dan de Europese referentiemethode (gravimetrie). Om de met de Osiris monitoren gemeten fijn stof concentraties te herleiden naar de referentiewaarde, wordt op een meetlocatie ook met de referentiemethode gemeten. Onderzoek laat zien dat de reproduceerbaarheid van twee Osiris monitoren beter is dan 3% bij vergelijking van 6 maanden uurlijkse PM10 metingen. Om die reden kan volstaan worden met het bepalen van de herleidingsfactor op slechts één meetlocatie. De onzekerheid (toevallige fout) van een 24-uurgemiddelde meting met de Osiris monitor na herleiding tot de referentiewaarde wordt geschat op 20% (95%-betrouwbaarheidsinterval) en is dus vrij groot. Het lijkt dus waarschijnlijk dat in de met de Osiris gemeten concentraties pas significante gradiënten in de concentraties van PM onderscheiden kunnen worden na middeling van de meetresultaten over meerdere dagen.

Deze eigenschappen maken de Osiris monitoren geschikt om binnen een gebied op meerdere locaties te meten en verschillen vast te stellen. Bij het gebruik van de Osiris in dit project worden dus andere meetinstrumenten gebruikt voor het vaststellen van de absolute concentratie. Lokale verschillen in concentratie (veroorzaakt door het effect van vegetatie) kunnen worden vastgesteld door metingen met meerdere Osiris instrumenten.

Afhankelijk van de mogelijkheden in het veld en het budget zal ook overwogen worden om TEOM apparatuur in te zetten. Deze meetapparatuur werkt wel met het gravimetrische principe en is in Europa de standaard meetmethode voor fijn stof. Wel is de integratietijd van de TEOM groter als voor de Osiris. Een voordeel van de TEOM is tevens dat de precisie iets beter is. Wel is de apparatuur kwetsbaarder en omvangrijker, hetgeen verhindert om de apparaten in het vrije veld te zetten. In de gekozen opzet kunnen slechts 3 Osiris'en vervangen worden door TEOM.

Zoals hierboven aangegeven zal ook referentieapparatuur (ook wel Klein Filter Gerät genoemd) worden ingezet (types: Leckel, Derenda). Deze apparatuur zal geplaatst worden voor en achter de vegetatie (10 m) om volgens de EU-richtlijnen de massaverschillen in PM10 en PM2.5 te kunnen meten die door de vegetatie wordt veroorzaakt. Het betreft hier dagfilters. Dit biedt tevens eventueel de mogelijkheid van analyse achteraf van de chemische samenstelling van het aangezogen stof, dit is momenteel niet voorzien binnen dit project.

Deeltjesgrootteverdeling en aantallen deeltjes in de lucht worden 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 wordt in een zgn. oversize channel gemeten. De LAS-X data maakt het mogelijk de volume concentratie te bepalen voor elke klasse alsmede de geïntegreerde volume concentratie na sommatie over alle klassen. De massa wordt berekend door een representatief soortelijk gewicht aan te nemen per grootteklasse. Op dit moment zijn 2 LAS-X instrumenten beschikbaar en 6 CPCs. De mogelijkheid bestaat dat deze aantallen nog worden uitgebreid. Voorzien is dat metingen als deze in ieder geval plaatsvinden op vaste punten voor en achter (10 m) de vegetatie. Het doel hiervan is vast te stellen welke invloed de aanwezigheid van vegetatie heeft op de deeltjesaantallen in de lucht (ook de heel kleine, de ultrafijne fractie) en op de grootteverdeling van die deeltjes. Eerder bleek al dat vooral de grotere deeltjes worden afgevangen.

6. Opzet modelexperimenten

6.1 Modelopzet PanAir

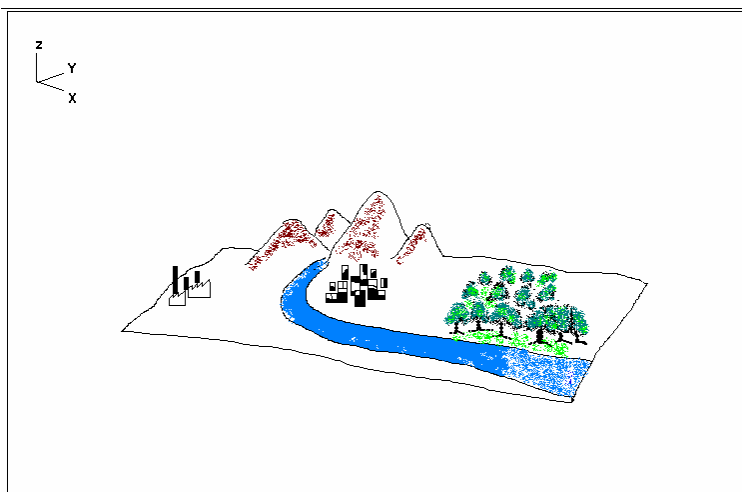
De modelwerkzaamheden worden uitgevoerd met het model Fluidyn-PanAir. PanAir is ontwikkeld door de TRANSOFT Group en maakt deel uit van een familie van verschillende CFD-codes. Fluidyn-PanAir is een geavanceerd 3-D model om op hoge ruimtelijke resolutie luchtkwaliteitsberekeningen te doen voor het stedelijke gebied. PanAir simuleert de verspreiding van luchtvervuiling voor verschillende meteorologische omstandigheden en is in staat rekening te houden met lage windsnelheden en convectie ten gevolge van straling in de stedelijke omgeving.

Dit hoofdstuk is als volgt opgezet. Het geeft eerst een overzicht van PanAir gevolgd door een technische beschrijving. Daarna wordt ingegaan hoe het model zal worden ingezet in dit project.

6.1. Modeloverzicht

Terrein

Het model houdt gedetailleerd rekening met het terrein. De details van het terrein worden door de gebruiker opgegeven. Het onderscheidt hoogteverschillen (in te voeren als hoogtelijnen), gebouwen, vegetatie, open veld, bos of wateroppervlakken:



De domeingrootte moet worden opgegeven. Oppervlakteruwheden zijn gegeven voor verschillende veldtypes (grasland, woestijn e.d.), maar kunnen ook handmatig worden ingesteld. De locatie van het terrein moet ook opgegeven worden om de instraling van de zon te kunnen berekenen.

Bos:

Boomhoogte, stamhoogte, leaf area density in stamgebied en verschillende kroongedeeltes. Optioneel de wrijvingscoëfficiënt of anders berekend op basis van LAD

Stedelijk gebied:

Gemiddelde gebouwhoogte en antropogene warmteflux

Let op: Bovenbeschreven veldtypes zijn algemene kenmerken van het terrein. Terrein details kunnen verder ingesteld worden met een hoge mate van detail, zoals vegetatiekenmerken of exact ingetekende gebouwen.

Meteorologie

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

Bronnen

PanAir beschikt over een uitgebreide chemische database waarin verontreinigende stoffen met hun chemische eigenschappen zijn opgenomen. Ook aerosolen maken deel uit van het model: sulfaat, lood en elementair koolstof in de verdeling PM₁, PM_{2.5}, PM₅ en PM₁₀.

PanAir beschikt over de mogelijkheden om in hoog detail broneigenschappen te beschrijven (sterkte, hoogte, tijdvariatie, warmteuitstoot, impulsuitstoot, uitstootrichting, etc..).

Voor verkeer beschikt PanAir over een aparte lijnbronmodule die de emissies berekent voor verschillende voertuigklassen op basis van verkeersintensiteiten, emissiefactoren en snelheid. Deze aanpak sluit goed aan bij de Nederlandse regelgeving.

Chemie

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

Depositie

PanAir berekent de depositie op basis van vegetatie- en stofeigenschappen. Gebruik maken van de vegetatie en de chemie database zijn de depositieparameters gegeven. Deze databases zijn door de gebruiker aan te passen. Verderop volgen meer details voor de depositie ten gevolge van vegetatie.

Ruimtelijke resolutie

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

Tijdintegratie

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

6.2 Validatiestudies

Er zijn uitgebreide validatiestudies uitgevoerd van de Panache software, die allen dezelfde centrale CFD-code bevatten en waar PanAir een onderdeel van is. In Bijlage A worden enkele validatiestudies nader toegelicht.

6.3 Technische beschrijving

Fluidyn-PanAir is een computer code voor de numerieke simulatie van atmosferische stromingen en van luchtverontreiniging op korte en middelgrote schaal. PanAir is gebaseerd op Computational Fluid Dynamics (CFD) technieken in een eindige elementen methode om de continuïteitsvergelijkingen voor massa, impuls en energie op te lossen.

Basisvergelijkingen

PanAir lost de continuïteitsvergelijkingen voor massa, impuls en energie op voor zowel laminaire als turbulente stromingen. The vergelijkingen voor beide typen stromingen verschillen voornamelijk in de vorm van de grootte van de transportcoëfficiënten (diffusie, viscositeit en warmteoverdracht).

De continuïteitsvergelijking voor tracer m is

$$\partial \rho_m / \partial t + \nabla \cdot [\rho_m \mathbf{u}] + \rho D_m \nabla^2 y_m = \rho_m^s + \rho_m^d + \rho_m^p + \rho_m^c \quad (6-1)$$

$$D_m = \mu_l / \rho_l + \mu_t / \rho_t \text{ or } S_{c_l} + S_{c_t}$$

Met

ρ_m	=	dichtheid m
ρ	=	Totale dichtheid
u	=	stroomsnelheid
D_m	=	diffusiecoëfficiënt for tracer m in lucht
y_m	=	mass fractie = ρ_m/ρ
ρ_{ms}	=	bronterm
ρ_{md}	=	Verliesterm t.g.v. droge depositie
ρ_{mp}	=	Netto bronterm t.g.v. verdamping en condensatie
ρ_{mc}	=	Netto bronterm voor chemische productie
Sc_l	=	Schmidt number voor laminaire stroming
Sc_t	=	Schmidt number for turbulente stroming
μ_l	=	Moleculaire viscositeit van lucht
μ_t	=	turbulente eddy viscositeit

Sommen over alle tracers, geeft de totale continuïteitsvergelijking voor de gehele stroming

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \bullet [\rho u] = \rho^s + \rho^d + \rho^p \quad (6-2)$$

Met		
ρ^s	=	Totale emissies
ρ^d	=	Totale depositie
ρ^p	=	Netto bronterm van alle verdamping en condensatieprocessen

De impulsvergelijking voor de stroming is

$$\partial \rho u / \partial t + \nabla \bullet [\rho u u + \sigma] = -\nabla p + F^s + F^g + F^d + F^p \quad (6-3)$$

Met		
P	=	druk
σ	=	spanningstensor
$= \mu[\nabla u + (\nabla u)^T] + \lambda(\nabla \bullet u)I$ (6-4)		
μ, λ	=	viscositeitscoëfficiënten
λ	=	$-2/3\mu$
τ	=	getransponeerde
I	=	eenheidsmatrix
F^s	=	Impulstoename als gevolg van emissies
F^g	=	Gravitatie
F^d	=	Wrijving ten gevolge van vegetatie
F^p	=	Wrijving ten gevolge van interactie met druppels

De interne energievergelijking is:

$$\frac{\partial \rho I}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho u I + J] = \rho \nabla \cdot u + \text{Dissip.} + Q^s + Q^d + Q^p + Q^h + Q^c \quad (6-5)$$

Met	
I	= Specifieke interne energie
J	= Warmte flux vector
	$= k \nabla T + \rho \sum [h_m \nabla (\rho_m / \rho)]$ (6-6)
k	= Thermische overdrachtscoefficient
T	= Temperatuur
h_m	= Specifieke enthalpie van tracer m
Q^s	= Toename van inwendige energie door emissies
Q^d	= Idem door droge depositie
Q^p	= Idem door interactie met deeltjes
Q^h	= idem door warmtefluxen van de bodem
Q^c	= Idem door chemische omzittingen
Dissip	= $\sigma \cdot \nabla u$ voor laminaire stroming $\rho \varepsilon$ voor turbulente stroming

In aanvulling worden de volgende 2 vergelijkingen gebruikt:

$$p = R_0 T \sum (\rho_m W_m) \quad (6-7)$$

Met	
R_0	= gasconstante
W_m	= Moleculaire massa van tracer m

$$I = \sum [y_m I_m(T)] \quad (6-8)$$

met I_m = de specifieke soortelijke warmte van tracer m

$$\mu = \mu_i + \mu_t \quad (6-9)$$

met μ_i = moleculaire viscositeit van lucht

μ_t = turbulente eddy viscositeit

Numerieke schema

PanAir lost bovengenoemde vergelijkingen op in de 3-dimensionale ruimte en de tijd. De tijd discretisatie is zo opgezet dat de het model zowel stationaire toestanden als verloop in de tijd kan berekenen. De ruimtelijke discretisatie is uitgevoerd in a 3-D grid opgebouwd uit hexahedrons. Er worden controlevolumes gebruikt om de eindige elementenbenaderingen voor elk volume te construeren. Tijdintegratie vindt iteratief plaats met een impliciete methode. Convectieve fluxen zijn niet rechtstreeks op te lossen. Hiervoor zijn twee methoden voorhanden in PanAir (gebaseerd op van Leers MUSCL schema).

Submodellen

Om de basisvergelijkingen op te lossen zijn een aantal submodellen nodig.

Gravitatie

Gravitatiekracht in de impulsvergelijking kan op drie wijzen worden opgelost: expliciet ($F = F_g = \rho g$), met het "buoyancy model" dat uitgaat van het verschil in dichtheid van de lucht, of de Boussinesq benadering dat uitgaat van temperatuurgradiënten.

Meteorologisch Model

Invoer

Om de basisvergelijkingen voor atmosferische stroming op te lossen zijn de volgende meteorologische grootheden benodigd:

- Windsnelheid en richting
- Verticale windprofiel
- Verticale temperatuurprofiel
- Instraling van de zon en wolkenbedekkingsgraad
- Luchtvochtigheid

Windsnelheid en richting

Windsnelheid en richting worden door het model zelf opgelost, maar PanAir heeft daarvoor wel randvoorwaarden nodig. De windsnelheid en richting kunnen als randvoorwaarden worden opgegeven als constante of er kan een tijdprofiel worden opgegeven. De windsnelheid kan ook worden opgelegd op meerdere punten in het domein. In dat geval bepaalt PanAir zelf de randvoorwaarden met een interpolatietechniek. Dit is vooral handig om bijvoorbeeld metingen te benutten om de randvoorwaarden op te leggen.

Verticaal windprofiel en temperatuurprofiel

Het verticale windprofiel en temperatuurprofiel kunnen worden voorgeschreven met een "power law" die uitgaat van de oppervlakte ruwheid of kunnen worden berekend op basis van de stabiliteit van de atmosfeer (Monin Obukhov similarity theory). Details worden onder gegeven bij micrometeorologische parameters.

Windprofiel power law

$$u(z) = u_a (z/h_a)^p \quad (6-10)$$

met u_a = windsnelheid gemeten
 h_a = hoogte anemometer
 p = exponent

Windprofiel berekend

$$u(z) = u_* / \kappa [\ln(z/z_0) + \Psi_1(\zeta)] \quad (6-11)$$

met $\zeta = z/L$
 u_* = frictiesnelheid
 z_0 = oppervlakteruwheid
 κ = von Karman constant = 0.41
 $\Psi_1(\zeta)$ = similarity profiel.

Temperatuurprofiel volgens power law

$$T(z) = T_g + I r_1 * z$$

$$T(z) = T_g + I r_1 * z_{inv} + I r_2 * (z - z_{inv}) \quad (6-12)$$

met

- T_g = temperatuur bij de grond
- $I r_1$ = temperatuur gradient in de inversielaag
- $I r_2$ = „, boven de inversielaag
- z_{inv} = inversiehoogte

Temperatuurprofiel berekend

$$\theta(z) = \sigma_h \theta_s / \kappa [\ln(z/z_0) + \Psi_2(\zeta)] \quad (6-13)$$

met

- θ = potentiële temperatuur
- σ_h = turbulente Prandtl nummer
- θ_s = temperatuurschaling
- $\Psi_2(\zeta)$ = similarity profiel

Micrometeorologische Parameters

De wind en temperatuurprofielen kunnen opgelegd worden als randvoorwaarde of met macht wetten. PanAir kan ze echter ook zelf berekenen met behulp van een bodem warmteflux model en Monin-Obukhov theorie.

De stratificatie van de grenslaag veroorzaakt een warmteflux vanuit de bodem naar de atmosfeer. De voelbare warmteflux, Q^h , (vgl 6-5) wordt geparаметriseerd met een bodem energiebalans:

$$Q^h + Q^e + Q^g = Q^a + Q^* \quad (6-14)$$

met

- Q^e = latente warmte flux
- Q^g = bodem warmte flux
- Q^a = antropogene warmteflux
- Q^* = netto stralingsflux

Q^e and Q^h zijn verdeeld volgens een versimpelde Penman-Monteith benadering (Holtslag and van Ulden, 1983). De netto stralingsflux, Q^* , is als volgt geparаметriseerd :

$$Q^* = (1 - A) * Q^{sw} + c_1 T^4 - \epsilon \sigma T^4 - c_2 N / (1 + c_3) \quad (6-15)$$

where

- A = oppervlakte albedo
- Q^{sw} = inkomende zonnestraling (short wave)
- N = wolkenbedekkingsgraad
- c_1, c_2, c_3 = constanten
- σ = Stefan-Boltzmann constante
- ϵ = oppervlakte emissiviteit
- T = temperatuur aan de grond

Als Q^h positief is (de bodem staat warmte af aan de atmosfeer), ontstaat een onstabiele stratificatie. Bij negatieve Q^h ontstaat een stabiele atmosfeer. Bij nul, een neutrale atmosfeer.

Frictiesnelheid u^* , temperatuur schaling θ^* en de Monin-Obukhov lengte L zijn als volgt gegeven:

$$L = u^{*2}T/(g\kappa\theta^*) \quad (6-16)$$

$$\theta^* = \kappa Q^h/(\rho C_p u^*) \quad (6-17)$$

met C_p = de soortelijke warmte van lucht

Het gemiddelde snelheids- en temperatuurprofiel volgens Monin-Obukhov theorie zijn:

$$\begin{aligned} \phi_m(\zeta) &= (\kappa z/u^*) \partial u/\partial z \\ \phi_h(\zeta) &= (\kappa z/\theta^*) \partial \theta/\partial z \end{aligned} \quad (6-18)$$

met $\zeta = z/L$

De micrometeorologische parameters, u^* , θ^* , en L worden voor de verschillende stabiliteitsregimes bepaald (Wang and Chen, 1980)

Vegetatie Model

De wrijvingsterm, F^d , in equation (6-3), t.g.v vegetatie is als volgt:

$$F^d = \kappa 0.5 C_d A u S \quad (6-19)$$

where C_d = wrijvingscoefficient
 A = geprojecteerde LAD (leaf area density) per volume
 u = snelheid
 S = gemiddelde snelheid $|u|$

De droge depositieterm, ρ_m^d , in equation (6-1), ten gevolge van vegetatie is :

$$\rho_m^d = A V_d \rho_m \quad (6-20)$$

met A_d = de droge depositieterm voor tracer m

Turbulentie Modellen

Er zijn drie turbulentiemodellen in PanAir. Alledrie houden ze rekening met de atmosferische stabiliteit, gebruik makend van het Richardson getal:

$$Ri = v_t g (1/\rho \partial \rho/\partial t - \rho/(\rho \gamma) - g) \rho/G \quad (6-21)$$

Of uitgaand van de temperatuur

$$Ri = g/T (\partial \theta/\partial z) \rho/G \quad (6-22)$$

met G = de turbulentieproductie door schering
 $= \sigma : \nabla u$

Onstabiel $Ri < 0$, Stabiel $Ri > 0$

k-ε model

De drie turbulentiemodellen zijn het zgn. K-diff model, k-epsilon model en het K-L model. In deze studie zal alleen het k-epsilon model worden toegepast. Deze is het meest geavanceerd en aangepast voor toepassing onder verschillende atmosferische condities (rekening houdend met buoyancy en de stabiliteit van de atmosfeer)

$$\partial \rho k / \partial t + \nabla \cdot [\rho u k - (\mu / \sigma_k) \nabla k] = 2/3 \rho k \nabla \cdot u + G (1 - Ri / \sigma_h) \rho \epsilon + W^p \quad (6-23)$$

$$\partial \rho \epsilon / \partial t + \nabla \cdot [\rho u \epsilon - (\mu / \sigma_\epsilon) \nabla \epsilon] = \epsilon / \kappa [C_1 G (1 - Ri / \sigma_h) - C_2 \rho \epsilon + C_s W^p] \quad (6-24)$$

met

σ_k	=	1.0.
σ_ϵ	=	1.2
C_1	=	1.44
C_2	=	1.92
C_s	=	1.5
W^p	=	turbulentie productie door interactie met deeltjes

$\sigma_h = 1.11$ voor het k-ε model

De turbulente viscositeit is gegeven door

$$\nu_t = C_E k^2 / \epsilon \quad (6-24)$$

met $C_E = 0.09$

6.3 Opzet modelberekeningen

Vorbereiding

De metingen van de vegetatiestrook, de typering en ligging e.d. zullen gebruikt worden om het model op te zetten voor de berekeningen. Hiermee zullen eerste verkennende berekeningen worden uitgevoerd om een eerste inzicht te verkrijgen. Het model zal uurlijks stationaire toestanden berekenen.

Vegetatiemodellering

De afremming van de stroming en de toename van turbulentie door vegetatie wordt door PanAir berekend met een wrijvingskracht. (zie 6-19) Deze is afhankelijk van de LAD. In dit project wordt de LAD gemeten.

De depositiesnelheid van sporengassen en ultrafijne deeltjes wordt beïnvloed door concentratieveranderingen ten gevolge van de afremming van de stroming en de toename van turbulentie. De droge depositieparameters worden aan PanAir gegeven via een invoerfile:

* dry deposition rates (cm/s)

	co	nox	hc	pm	co2
ground	0.732	1.0	0.471	27.1	5.92
mango	0.725	5.0	0.463	26.4	5.92

etc...

Deze invoerfile is door de gebruiker zelf verder aan te passen. Deze parameters worden in dit project in een aparte module voor droge depositie ten gevolge van vegetatie berekend. Deze module "het weerstands-lagen model" is in bijlage A van dit rapport beschreven.

Zoals in de bijlage beschreven wordt in het model een aparte module opgenomen met daarin de beschrijving van de interactie tussen de vegetatie enerzijds en gassen of deeltjes anderzijds.

Bij het simuleren van de processen die optreden in de gemeten perioden worden de parameters in het model gestuurd door metingen. Tijdens de meetperioden dienen daarom deze parameters rechtstreeks te worden gemeten dan wel indirect uit metingen van andere grootheden te worden afgeleid. Het gaat daarbij om:

- Leaf area density (LAD). Deze grootheid beschrijft de hoeveelheid blad als functie van de hoogte. Deze parameter zal rechtstreeks worden bepaald door middel van verschillende, veelal optische technieken (zoals fotografische).
- Porositeit Deze parameter beschrijft de doorlaatbaarheid van de vegetatie. Ook aan de hand van fotografie te bepalen.
- De toestand van de huidmondjes. Deze wordt door veel parameters gestuurd. Ze zijn niet alle gemakkelijk meetbaar. Daarom zal de huidmondjes toestand worden afgeleid uit metingen van andere parameters en een model. Dergelijke modellen zijn al zeer goed bekend en geven een goede voorspelling. Het is ook mogelijk de modellen aan de vegetatie ter plaatse door een beperkt aantal metingen te toetsen. Om het model te sturen zullen metingen worden uitgevoerd van:
 - o lichtintensiteit (globale straling en of fotosynthetisch actieve straling) op veel
 - o relatieve luchtvochtigheid
 - o luchttemperatuur
 - o enkele parameters die te maken hebben met de voor de planten beschikbare hoeveelheid waterHiervan zullen zo mogelijk ter plaatse enkele metingen worden uitgevoerd.

De resultaten van de modelberekeningen zullen, voor wat betreft de concentratie van stoffen zoals NO₂ en fijn stof, direct met elkaar worden vergeleken. Het betreft hier een eenvoudige vergelijking waarbij de gemeten concentratie op een bepaalde plaats wordt vergeleken met de met het model berekende concentratie. De vergelijking geeft inzicht in de kwaliteit van het model.

De gemeten achtergrondconcentratie van stoffen (de concentratie stroomopwaarts van de weg) zal dienen als invoer voor de modelberekeningen.

Er is een uitgebreide aerosolmodule in PanAir aanwezig. Hiermee is het mogelijk de sedimentatie van de grotere deeltjes en de vorming van grotere deeltjes door coagulatie te beschrijven (alleen voor grotere tijdschalen). Aangezien de vegetatiestrook zich aan de rand van de snelweg bevindt, is het nodig van deze module gebruik te maken.

6.4 Verkeersemissies

Voor de verkeersemissies heeft PanAir een gedetailleerde emissiebron. Om aan te sluiten bij de Nederlandse regelgeving wordt de emissiemodule gevoed met de VERSIT+ emissiefactoren en actuele verkeerstellingen van autoverkeer, middelzwaar en zwaar vrachtverkeer. Voor een goede modellering van zijn actuele verkeerstellingen nodig met uurlijkse gemiddelden.

6.5 Vergelijking met de metingen

De vergelijkingen met de metingen hebben 2 doelen:

1. het model zo goed mogelijk laten aansluiten op de metingen
2. het berekende vegetatie-effect valideren

Ad 1.

Metingen van de turbulentie, windsnelheid en temperatuur (op andere punten dan gebruikt voor de randvoorwaarden) zullen rechtstreeks met de berekeningen worden vergeleken. Bij afwijkingen wordt gekeken naar mogelijke oorzaken en zal de modelopzet zo mogelijk worden aangepast. Omdat meerder meetdagen en verschillende condities zullen worden bekeken kan men er van uitgaan dat de aanpassingen de voorspellende waarde van het model zullen verbeteren, ook voor andere situaties met een andere ligging en vegetatiestructuur.

Hierbij gaat speciale aandacht uit de initiële turbulentie door verkeer. Deze is slecht bekend en heeft veel invloed op de verspreiding. Deze parameter is in PanAir op te leggen en kan benut worden om het model beter in overeenstemming te krijgen met de metingen.



Ad 2.

De gemodelleerde reducties van concentraties zullen rechtstreeks met de gemeten reducties worden vergeleken. Rechtstreekse vergelijking van de gemodelleerde concentraties en metingen is niet zinvol omdat de bronsterkte van de snelweg vrij onzeker is.

6.6 Parametrisatie van het vegetatie effect

Wordt er een significant effect van vegetatie gevonden dan is er behoefte om voor de Nederlandse wetgeving (MRV en opvolger Beoordeling Luchtkwaliteit 2007) een vereenvoudigde modelaanpak te formuleren.

In dit project is een dergelijke formulering niet voorzien, maar er wordt wel naar gestreefd om een aanbeveling te doen in welke richting een dergelijke modelaanpak moet worden gezocht.

7. Offerte realisatie

Begroting Vegetatie en luchtkwaliteit, Perceel I

Bedragen incl. BTW

		<i>ECN</i>	<i>TNO</i>	<i>PRI</i>	
Vergoeding Boer 1	2000				
Vergoeding Boer 2	1000				
Huurkosten					
Cabins/Generatoren	7000				
Electriciteit	1000				
Manuren		70200	70200	35100	
Materialen		4000	4000	1500	
Reiskosten		4000	2000	2000	
Rapportage/drukkosten	1000				
Apparatuureenheden		5000			
Totaal	12000	83200	76200	38600	210000
Meerkosten aerosol uitbr.	4000	20000	20000	2000	46000

8. Kwaliteitscontrole en -beheersing

ECN en TNO Bouw en Ondergrond zijn gecertificeerd volgens ISO9001 en ISO14001. De projectadministratie en alle werkzaamheden zullen worden verricht onder de condities en voorwaarden zoals geschapen door deze certificeringen. Bij het uitvoeren van veldwerkzaamheden is naast de zorg voor het milieu een goede omgang met arbeidsomstandigheden en een degelijke Risico- en Veiligheidsanalyse van groot belang, ondanks de kostenverhogende factor van deze maatregelen.

De kwaliteit van de metingen wordt bepaald door een groot aantal factoren. Vooral zijn daarbij de opzet van het meetprogramma (de meetstrategie), de daarmee samenhangende representativiteit van de metingen en de kwaliteit van de metingen van de verschillende grootheden.

De invloed van de meetstrategie op de kwaliteit van de resultaten is op dit moment lastig in kaart te brengen. Die zal gedeeltelijk blijken uit de resultaten van het onderzoek en uit redeneringen achteraf.

De representativiteit van de metingen hangt onder andere samen met:

- de lengte van de meetperiode (in principe twee perioden van zes weken) en de weersomstandigheden gedurende die periode. Vooral de windrichting is daarbij bepalend. Statistisch gezien zal dit een periode van drie weken totaal, ofwel 21 meetdagen met goede metingen opleveren (25%).
- De representativiteit van de vegetatie (soort en structuur etc.) en de ligging van deze ten opzichte van de weg. De invloed van de keuze van de vegetatie en de locatie kan mogelijk aan de hand van modelberekeningen in kaart worden gebracht. In de praktijk zal die neerkomen op een analyse aan de hand van modelberekeningen waarbij de gevoeligheid van de uitkomsten voor parameters die de vegetatie beschrijven zal worden onderzocht

De kwaliteit van de apparatuur om concentraties te meten wordt traditiegetrouw vastgesteld aan de hand van calibraties uitgevoerd met behulp van primaire standaarden. TNO beschikt over een laboratorium waarmee dergelijke calibraties worden uitgevoerd. De kwaliteitsbepalende apparatuur zal voor en na de meetcampagnes in het laboratorium worden gecalibreerd. Het gaat daarbij om de NOx en O3 monitoren.

Tijdens de meetcampagnes zal de kwaliteit van de metingen in het geval van de monitoren voor NOx wekelijks in het veld worden geverifieerd. Dit zal gebeuren met behulp van een speciale calibratie unit die geldt als secundaire standaard. Alle metingen worden opgeslagen in drie centrale computers die via een UMTS verbinding in het laboratorium van ECN in Petten real-time gevolgd kunnen worden. Dagelijks zal de juiste werking van de systemen gecontroleerd worden en bij problemen zullen zo goed en snel als redelijkerwijs mogelijk is corrigerende acties ingezet worden.

Het calibreren van meetinstrumenten voor fijn stof is minder eenvoudig. In het veld zullen daarom metingen met referentie methoden (gravimetrische methoden en TEOM) worden uitgevoerd. Daarbij kunnen achteraf correcties worden aangebracht op de door deeltjes tellers en andere apparatuur uitgevoerde metingen.

Voor de continue metingen is de invloed van regen niet negatief. De extra fijn stof metingen zijn onder die condities wel lastig. Bij windstilte en windsnelheden boven de 15 m/s zijn de extra metingen ook niet mogelijk en tevens ook minder nuttig.

9. Randvoorwaarden en risico's

Een aantal randvoorwaarden is van belang voor het slagen van het project. Deze worden hier kort besproken. Belangrijk voor het welslagen van de meetcampagnes zijn:

- Een gunstige meteorologische situatie. Er zijn in het project twee meetperioden van 6 weken voorzien. De verwachting is dat gedurende deze twaalf weken er een voldoende groot aantal dagen is waarbij de windrichting gunstig is voor het uitvoeren van experimenten. Gezien de ligging van de weg gaat het hier om westelijke winden.
- De goede werking van de apparatuur. NOx monitoren en deeltjestellers zijn essentieel in het onderzoek. TNO en ECN beschikken over voldoende reserve apparatuur om in noodgevallen binnen enkele dagen apparatuur in te zetten. Bovendien zal in de experimentele opzet in een aantal gevallen sprake zijn van een 'dubbele' uitvoering van de meetapparatuur. Daardoor is bij uitval van een enkel apparaat het experiment niet verloren.
- Geen belemmering van de uitvoering van het experiment. Dat wil zeggen:
 - o Mogelijkheden en toestemming om op het terrein van de betrokken boeren experimenten uit te voeren. Het gaat om de beschikbaarheid van geschikte stroomvoorziening op de meetlocaties. Dit zal, naar verwachting in overleg met de boeren in de omgeving worden opgelost. Een andere optie is het gebruik van een generator. Ook dient toestemming om terreinen te betreden worden verkregen. Het betreft twee boeren aan weerszijden van de A50. Met de boer aan de oostelijke zijde van de A50 is al overleg geweest. Hier lijken vooralsnog geen belemmeringen. Met boeren aan de westkant is nog geen overleg geweest. Hier zijn meerder opties mogelijk, de plaatsing van de apparatuur om de achtergrond concentraties te bepalen is niet zo kritisch, en de verwachting is dat dit niet tot problemen zal leiden. Mogelijk is een financiële vergoeding noodzakelijk. De verwachting is niet dat dit tot problemen leidt.
 - o Mogelijkheden vandalisme (door mens en dier) uit te sluiten dan wel de gevolgen daarvan te beperken. De opstelling zal zoveel mogelijk veilig en bestendig worden uitgevoerd. In het verleden zijn echter wel problemen opgetreden. Diefstal en vandalisme door dieren kan daarbij tot ernstige problemen leiden. Het is budgettair niet mogelijk gedurende de meetperiode permanente bewaking aanwezig te hebben. Problemen als gevolg hiervan vormen een blijvend risico dat niet alleen voor de contractanten kan worden gedragen.
 - o Toestemming en samenwerking met de beheerder van de A50. Ook hier zijn op dit moment geen problemen voorzien op basis van eerdere ervaringen.
 - o Gegevens over verkeersintensiteiten en samenstelling ten tijde van de uitvoering van de metingen. De verwachting is dat deze door of via diensten van Rijkswaterstaat tijdig beschikbaar komen.

10. Conclusies en aanbevelingen

Gezien de grootte van de te verwachten effecten is bij de opzet veel aandacht besteed aan het vermijden van systematische fouten bij de metingen van de verschillen en het kiezen van die parameters waaraan de te verwachten effecten het meest duidelijk zijn. Zo zal door het meten van deeltjesgrootteverdeling en –aantal duidelijk worden welke delen van het fijn stof al dan niet opgevangen worden door vegetatie, en welke invloed aan de vergrootte turbulentie door de obstakelwerking van vegetatie toe te schrijven is. Voor NO₂ is tevens belangrijk hoe de interactie tussen turbulentie en chemie met Ozon is.

Voor het vaststellen van de relatieve effecten van vegetatie op fijn stof lijkt bepaling van de totale massaconcentratie per se niet gevoelig genoeg. De relatief meer geavanceerde metingen met LAS-X en CPC's bieden mogelijkheden om meer zicht te krijgen op welke deeltjes waar in de vegetatie afgevangen worden, meer van deze metingen dan de enkele voorziene meting zou dus een uitstekende aanvulling betekenen. Tevens verdient het aanbeveling om op enkele plaatsen in plaats van de voorziene Osiris apparatuur TEOM apparatuur in te zetten. Deze wijzigingen brengen wel extra kosten met zich mee, maar vergroten de succeschansen van het project in aanzienlijke mate.



11. Verklaring bereidheid tot realisatie

Bij deze verklaren de deelnemers aan het consortium zich bereid tot het uitvoeren van de metingen en modellering zoals beschreven in het voor u liggende ontwikkelingsrapport.



Literatuur

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

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

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

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

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

Smith W.H. & B.J. Staskawicz, 1977. Removal of atmospheric particles by leaves and twigs of urban trees: some preliminary observations and assessment of research needs. Environmental Management 1, 317-330.

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

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

Wesseling J.P., J. Duyzer, A.E.G. Tonneijck & C.J. Van Dijk, 2004. Effecten van groenelementen op NO2 en PM10 concentraties in de buitenlucht, TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie, Apeldoorn, 43 pp.

Bijlage A

Basismodel voor opname van NO₂

A.1 Modelbeschrijving

In deze Bijlage wordt ingegaan op methoden om de opname van NO₂ door vegetatie elementen te schatten. Allereerst wordt het weerstands model besproken. Vervolgens wordt dit model gebruikt in om een methode af te leiden om de opname van gassen door vegetatie elementen langs een weg stoffen te beschrijven.

Het weerstandslagenmodel

Veel onderzoek over de opname van gassen door planten is in eerste instantie uitgevoerd in het kader van studies naar planten groei. Het ging daarbij vooral om de opname en afgifte van waterdamp en kooldioxide. In een later stadium is veel kennis opgebouwd bij onderzoek naar de atmosferische depositie van verzurende verbindingen. Teneinde de resultaten van een beperkt aantal experimenten te generaliseren is vaak gebruik gemaakt van een zogenaamd weerstands- of lagenmodel. Dit model kan men zich als volgt voorstellen.

Als voorbeeld de opname van een kooldioxide molecuul dat meegenomen door de wind over een grasveld wordt getransporteerd. Uitgangspunt is dat de plant op dit moment behoefte heeft aan kooldioxide. Door de turbulente, verticale luchtbewegingen worden de moleculen tot zeer dicht bij de gras sprietten gebracht. Rondom deze grassprietten bevindt zich een (min of meer) stilstaande luchtlaag die de moleculen eerst moeten passeren alvorens ze door het gras kunnen worden opgenomen. Tenslotte zal het er vanaf hangen of de huidmondjes van het gras op dat moment open dan wel dicht zijn of het kooldioxide molecuul al dan niet kan worden opgenomen. Als het molecuul vervolgens in de plant is terechtgekomen dan hangt het weer van de concentratie van opgeloste kooldioxide in de plantensappen af of een gasvormig molecuul werkelijk wordt opgenomen. In dit voorbeeld was al gesteld dat de plant de kooldioxide wil opnemen (m.a.w. de concentratie van kooldioxide in de plant is laag). Dat hoeft niet altijd zo te zijn. In een andere situatie zou het kunnen voorkomen dat de plant geen kooldioxide meer wil opnemen. De interne concentratie loopt dan op en de opname loopt terug en stopt zelfs. Aan de andere kant is bekend dat bij hogere concentraties van kooldioxide de opname kan worden gestimuleerd en de groei bevorderd. De drijvende kracht voor opname is dus het verschil tussen de concentratie in de lucht en die intern in de plant.

Het transport vanuit de atmosfeer naar de plant wordt in het zogenaamde 'big leaf' model voorgesteld als transport door verschillende lagen: een turbulente luchtlaag, vanuit de lucht naar de bladeren, een laag met stilstaande lucht rondom de bladeren en de laag die het openen en sluiten van de stomata weergeeft (Jarvis, 1976). Elke laag heeft zijn eigen weerstand tegen dit transport. Zo zal het transport door de onderste luchtlaag van de atmosfeer afhangen van de turbulentie. Wanneer er veel turbulentie is dan is de weerstand laag en omgekeerd is de weerstand hoog bij lage turbulentie. Bij hoge windsnelheid gecombineerd met een aërodynamisch ruw oppervlak is de turbulentie hoog en de weerstand dus laag. De dikte (en daarmee de weerstand) van de (pseudo)laminaire luchtlaag rondom de blaadjes is ook afhankelijk van de turbulentie. Naarmate de turbulentie hoger wordt, wordt de laag dunner en weerstand lager. De snelheid waarmee andere stoffen dan kooldioxide door een laminaire luchtlaag diffunderen is afhankelijk van de diffusie coëfficiënt van die stof. Lichte moleculen (zoals waterdamp) gaan sneller dan zware moleculen zoals polycyclische aromaten. De weerstand tegen opname in de stomata hangt nauwelijks van de turbulentie af. Deze (stomataire) weerstand wordt door de plant zelf bepaald en hangt af van de condities met betrekking tot water, licht, groeistoestand enzovoort en specifieke eigenschappen (oplosbaarheid, afbraaksnelheid) van de stof. Zoals hierboven al gemeld bepalen tenslotte de interne processen in de plant of een plant uiteindelijk kooldioxide zal opnemen.

De parallel met de Wet van Ohm is eenvoudig in te zien:

- De drijvende kracht voor opname is het verschil tussen de concentratie van de in de atmosfeer ($C_{atmosfeer}$) en die intern in de plant (C_{plant}). De drijvende kracht is dus equivalent aan het spanningsverschil tussen twee spanningsbronnen (V).
- De weerstand tegen opname is opgedeeld uit een aantal weerstanden in serie:

- de weerstand van de turbulente luchtlaag (R_a);
- de weerstand van de pseudo laminaire luchtlaag rondom de vegetatie-elementen (R_b);
- de weerstand tegen opname via de huidmondjes of rechtstreeks aan het bladoppervlak (R_c). Stoffen kunnen ook oplossen in waterfilmpjes op het bladoppervlak.

De totale weerstand is dus:

$$R_{tot} = R_a + R_b + R_c$$

De hoeveelheid kooldioxide M (in $g/m^2/s$) die wordt opgenomen door de plant (overeenkomend met de stroom I uit de wet van Ohm) wordt gelijk gesteld aan:

$$M = (C_{atmosfeer} - C_{plant}) / R_{tot} = (C_{atmosfeer} - C_{plant}) / (R_a + R_b + R_c) \quad (B2-1)$$

Daarbij moet rekening gehouden worden met de juiste eenheden voor de concentratie in de plant. Voor stoffen zoals ozon en waarschijnlijk ook stikstofdioxide (NO_2) die in de plant worden afgebroken, is de concentratie in de plant C_{plant} verwaarloosbaar klein. De depositie wordt daardoor rechtevenredig met de concentratie in lucht d.w.z.

$$M = C_a / R_{tot} = v_d C_a \quad (B2-2)$$

Daarin is $C_a = C_{atmosfeer}$ (de concentratie op een referentie hoogte) en is v_d de zogenaamde depositiesnelheid en $v_d = 1 / R_{tot}$. Het aantrekkelijke van dit model is dat het atmosferische gedeelte van het transport is losgekoppeld van het plantkundige gedeelte. Waarden voor de atmosferische weerstanden R_a en R_b zijn uit een groot aantal (veld-)studies al zeer goed bekend

$$R_a = \frac{U_z}{u_*^2} \quad (B2-3)$$

(waarin U_z de windsnelheid op de referentie hoogte is en u_* de zogenaamde wrijvingsnelheid is, een maat voor de turbulentie-intensiteit). R_b de weerstand van de laminaire luchtlaag rondom de vegetatie-elementen wordt bepaald door de turbulentie intensiteit enerzijds (bepaald de dikte van de laag) en anderzijds door de diffusiesnelheid van de gasmoleculen:

$$R_b = \frac{2}{ku_*} \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (B2-4)$$

Waarin k de *von Karman's* constante is (0,4), Sc het *Schmidt* nummer (de verhouding tussen de kinematische viscositeit en de moleculaire diffusiecoëfficiënt) en Pr het *Prandtl* getal (0,72).

De waarden voor R_c kunnen uit aparte studies worden bepaald. Deze kunnen in principe zelfs uit specifieke begassingsexperimenten worden afgeleid.

Zoals hierboven vermeld kan opname plaatsvinden aan het bladoppervlak (adsorptie, afbraak of oplossen in waterlaagjes) of opname via stomata. Modellen om de opname aan het bladoppervlak te beschrijven zijn nog nauwelijks bekend. Meestal worden schattingen voor het belang van dit proces uit metingen afgeleid.

Modellen om de snelheid van opname door stomata zijn wel in de literatuur beschikbaar. De meeste zijn van de basisvorm:

$$R_c = R_{s,min} f(stof) * f(PAR) f(vpd) f(waterpotential) / LAI \quad (B2-5)$$

waarin $R_{s,min}$ de minimale plantspecifieke stomataire weerstand is. Deze wordt gevonden onder optimale condities met betrekking tot lichtintensiteit (PAR), luchtvochtigheid (vpd) en condities met betrekking tot de waterhuishouding ($waterpotential$). Met de factoren f kan gecorrigeerd worden voor niet optimale condities m.b.t. de lichtintensiteit, luchtvochtigheid en waterhuishouding. Met de factor $f(stof)$ wordt gecorrigeerd voor het verschil in diffusiesnelheid tussen waterdamp en de desbetreffende stof (in dit geval NO_2)

$$f(stof) = \frac{D_{NO_2}}{D_{H_2O}} \quad (B2-6)$$

waarin D de diffusiesnelheid van de desbetreffende stof aangeeft. De $L(eaf) A(rea) I(index)$ geeft de hoeveelheid bladoppervlak per vierkante meter aan. Deze hangt af van de bladerdichtheid en kan waarden bereiken tot $10 \text{ m}^2/\text{m}^2$. In de winterperiode is de LAI voor loofbomen dus bijzonder laag. In het hier beschreven Big Leaf model daalt de weerstand steeds met toenemende LAI . Dit is in de praktijk uiteraard niet het geval. Een dicht bladerdek zal de onderliggende bladeren afschermen van licht. Deze effecten kunnen met een gedetailleerder model met meer lagen beter worden beschreven. Het hierboven beschreven model is zeer uitgebreid onderzocht en getoetst voor waterdamp en kooldioxide (Monteith en Unsworth, 1990, Erisman et al., 1996) Ook voor de opname van luchtverontreiniging zoals ozon blijkt het model uitstekend bruikbaar (Duyzer et al., 1996).

Voor de praktijk voor NO_2 is het belangrijk verschillende regimes te onderscheiden.

Stoffen die goed worden opgenomen door de vegetatie

Bij stoffen die zeer goed worden opgenomen is de R_c waarde gelijk aan nul. De totale weerstand hangt dus alleen maar af van de weerstand tegen transport door de atmosfeer. Bij dergelijke stoffen (zoals vaak ammoniak) wordt de opnamesnelheid (depositiesnelheid) dus beperkt door de weerstand tegen transport door de atmosfeer. Hoe hoger de turbulentie, hoe sneller de opname. Tabel 1 geeft een overzicht van de waarden voor de verschillende weerstanden tegen opname voor stikstofdioxide NO_2 . De maximale depositiesnelheid bedraagt maximaal 200 mm/s boven bossen overdag. Dit geldt dus voor goed oplosbare stoffen zoals ammoniak op een vochtig bos. In alle andere omstandigheden zal de depositiesnelheid dus lager zijn dan $v_{max} = 1/(R_a + R_b)$

Tabel 1 Typische waarden voor $R_a + R_b$ (in s/m) en de maximale depositiesnelheid v_{max} (in mm/s) voor grasland en bos voor verschillende atmosferische condities. Stabiele atmosfeer treedt voornamelijk 's nachts op, een neutrale atmosfeer treedt op bij harde wind en bewolkte hemel terwijl een instabiele atmosfeer vooral overdag optreedt (windsnelheid 8 m/s op 100 m hoogte) (Duyzer en Fowler, 1994).

Atmosfeer →	stabiel		Neutraal		instabiel	
Vegetatiesoort	$R_a + R_b$	v_{max}	$R_a + R_b$	v_{max}	$R_a + R_b$	v_{max}
Gras	100	10	50	20	40	25
Bos	35	30	10	100	5	200

Stoffen die minder goed worden opgenomen

Bij andere stoffen die slecht worden opgenomen zoals ozon doet de weerstand in de atmosfeer er eigenlijk nauwelijks toe. De opname aan de stomata is snelheidsbeperkend. Dit geldt voor vrijwel alle stoffen die uitsluitend door stomata worden opgenomen. De stomataire weerstand is vrijwel nooit lager dan 50 s/m ofwel een maximale depositiesnelheid van 20 mm/s . Vergelijking met Tabel 1 laat zien dat deze waarde meestal lager ligt dan de maximale waarde (v_{max}). Een stof zoals ammoniak waarvoor opname wordt gevonden, sneller dan door stomata kan worden verklaard (Duyzer, 1994), wordt waarschijnlijk ook vooral opgenomen aan het bladoppervlak (naast opname door stomata).

Stikstofdioxide

Voor stikstofdioxide is de situatie echter minder duidelijk. Terwijl in begassingsexperimenten steeds een redelijk sterke opname werd gevonden werden in veldstudies deze resultaten nooit bevestigd (Duyzer en Fowler, 1994). Dit hangt waarschijnlijk samen met artefacten zoals ruis in de meetinstrumenten, chemische reacties tussen stikstofmonoxide en ozon in de atmosfeer. De depositiesnelheid voor stikstofdioxide is in ieder geval niet hoog! Daarom wordt geconcludeerd dat stikstofdioxide, niet aan het bladoppervlak wordt opgenomen of afgebroken. De opnamesnelheid wordt daarom beperkt door de snelheid van opname door de stomata. Naast de opname door stomata wordt soms nog een opname of afbraak aan het bladoppervlak gerapporteerd. Deze opname is overdag kleiner dan de stomataire maar is 's nachts mogelijk de enige route.

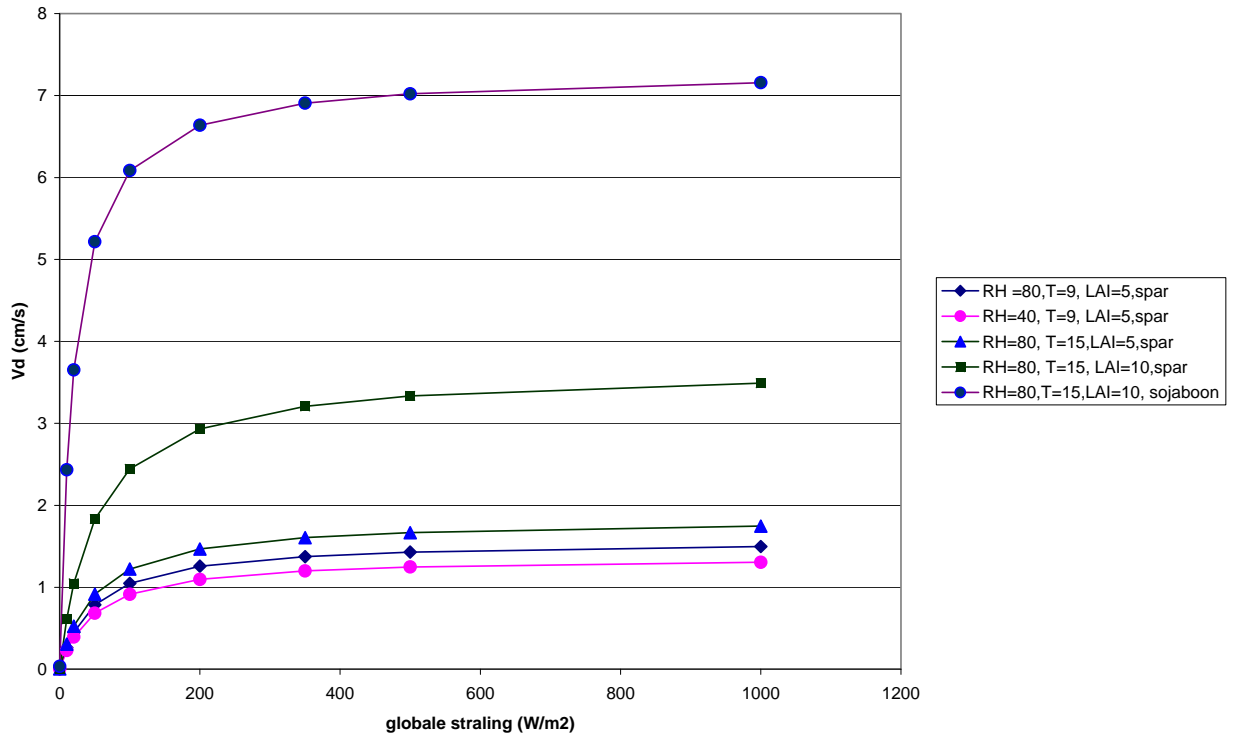
Tabel 2 Verband tussen huidmondjes geleidbaarheid en NO_2 -N opname van enkele gewassen en boomsoorten.

Soort	Huidmondjes-geleidbaarheid (cm s ⁻¹)	Opname (mg N dm ⁻² d ⁻¹)	Referentie
Gewassen			
Zonnebloem	2,07 ± 0,22	0,55	Okano <i>et al.</i> , 1988
Radijs	1,69 ± 0,53	0,45	
Tomaat	0,91 ± 0,21	0,35	
Tabak	0,85 ± 0,11	0,32	
Komkommer	0,72 ± 0,28	0,28	
Boon	0,58 ± 0,20	0,25	
Maïs	0,16 ± 0,10	0,21	
Sorghum	0,20 ± 0,08	0,18	
Boomsoorten			
Populus nigra '106'	1,42 ± 0,38	0,30	Okano & Machida (1989)
Populus nigra '104'	1,05 ± 0,24	0,29	
Populus nigra '51'	1,28 ± 0,26	0,29	
Nerium indicum	0,78 ± 0,20	0,20	
Zelkova serrata	0,51 ± 0,30	0,20	
Euonymus japonicus	0,49 ± 0,14	0,18	
Quercus myrsinaefolia	0,16 ± 0,08	0,09	
Viburnum awabuki		0,06	
Cinnamomum camphora	0,10 ± 0,01	0,06	

Met behulp van het weerstandmodel is inzicht te verkrijgen in de invloed van verschillende factoren op de opname. Figuur 1 laat de invloed van de verschillende parameters zien op de depositie op sparren en sojaboon. Voor andere boom- en plantensoorten zullen uiteraard andere waarden berekend worden voor de depositiesnelheid. In grote lijnen is de invloed van de verschillende parameters echter waarschijnlijk overeenkomstig. Drie effecten domineren:

- de lichtintensiteit (globale schatting);
- de blad dichtheid (LAI);
- de plantensoort.

Van deze parameters is de lichtintensiteit niet goed beïnvloedbaar. Nachts zal de opname dus beduidend minder zijn dan overdag. De plantensoort en indirect of rechtstreeks daarmee de hoeveelheid blad is uiteraard een parameter die wel beïnvloedbaar is.



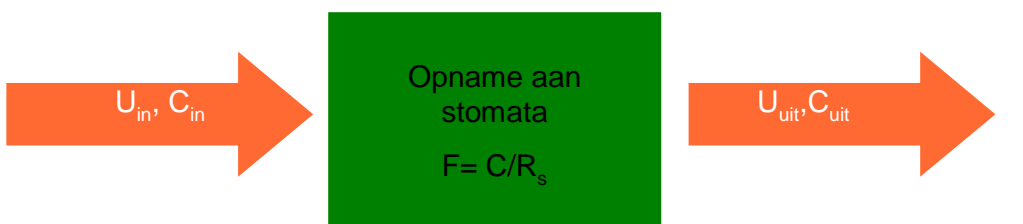
Figuur 1 Invloed van enkele parameters op de maximale depositiesnelheid van NO₂ op spar en sojaboon.

Opname van stoffen door vegetatie elementen langs wegen

Zoals uit het bovenstaande blijkt geldt dat de weerstand tegen opname van NO₂ door vegetatie maximaal gelijk is aan de weerstand tegen opname via de stomata (afgezien van een kleine opname aan de cuticula). De weerstand tegen het transport door de atmosfeer lijkt verwaarloosbaar. Dat betekent dat het er niet toe doet of de stoffen verticaal aangevoerd worden vanuit de atmosfeer dan wel horizontaal vanaf bijvoorbeeld een weg. De snelheidsbepalende stap is immers de opname door de stomata. Daarbij wordt er van uitgegaan dat het vegetatie-element niet zodanig dun is dat de verblijftijd in de vegetatie te klein wordt voor effectieve uitwisseling tussen lucht en bladeren.

A.2 Opname van NO₂ en fijn stof in het CFD model

In het CFD model wordt de massabalans berekend over een aantal gridelementen. Voor elk element wordt een massabalans berekend. Het gaat nu vooral om elementen waarin zich vegetatie (bladeren) bevindt. Stoffen worden door de stroming het element ingevoerd. Wanneer het betreffende element geen vegetatie bevat stromen de stoffen er ook op de dezelfde wijze weer uit. Wanneer er zich in het element actieve vegetatie bevindt dan wordt met het hierboven beschreven weerstand model berekend hoeveel van de stof wordt opgenomen. Op basis van een benadering kan de opname dan worden geschat (zie Figuur 2). Hoeveel er op dat moment wordt opgenomen hangt dan samen met de toestand van de vegetatie zoals die in het model (en in de werkelijkheid wordt bepaald door de meteorologische condities).



Figuur 2 Schematische weergave van de opname door een gridelement

De opname van fijn stof kan ook met het weerstand model worden beschreven al is bij de beschrijving veel complexer. Verschillende processen spelen een rol.

- sedimentatie Het uitzakken van deeltjes. Dit proces dat vooral van belang is voor grotere deeltjes is in het CFD model al opgenomen. Het verlies proces hangt vooral af van de massa van het deelt

A.3 Kwantificeren van vegetatie effecten

Er zijn 3 typen berekeningen worden uitgevoerd:

1. Alle vegetatieprocessen actief
2. Alleen weerstand van de vegetatie (depositie uit)
3. Geen vegetatie

Met deze berekeningen zijn de effecten van vegetatie te onderscheiden (afremming vs filtering) en het totale effect van vegetatie.

A.4 Afstemming met de metingen

Vegetatietypering zal worden gebruikt om het model op te zetten (6.5.1)

De metingen aan de vegetatiestrook zullen worden gebruikt om het depositiemodel te voeden (6.5.2)

De metingen van windsnelheid, vocht, temperatuur, instraling, bedekkingsgraad zullen worden benut om het model van randvoorwaarden te voorzien.

Zoals in deze bijlage beschreven wordt in het model een aparte module opgenomen met daarin de beschrijving van de interactie tussen de vegetatie enerzijds en gassen of deeltjes anderzijds.

Bij het simuleren van de processen die optreden in de gemeten perioden worden de parameters in het model gestuurd door metingen. Tijdens de meetperioden dienen daarom deze parameters rechtstreeks te worden gemeten dan wel indirect uit metingen van andere grootheden te worden afgeleid. Het gaat daarbij om:

- Leaf area density (LAD). Deze grootheid beschrijft de hoeveelheid blad als functie van de hoogte. Deze parameter zal rechtstreeks worden bepaald door middel van verschillende, veelal optische technieken (zoals fotografische).
- Porositeit Deze parameter beschrijft de doorlaatbaarheid van de vegetatie. Ook aan de hand van fotografie te bepalen.
- De toestand van de huidmondjes. Deze wordt door veel parameters gestuurd. Ze zijn niet alle gemakkelijk meetbaar. Daarom zal de huidmondjes toestand worden afgeleid uit metingen van andere parameters en een model. Dergelijke modellen zijn al zeer goed bekend en geven een goede voorspelling. Het is ook mogelijk de modellen aan de vegetatie ter plaatse door een beperkt aantal metingen te toetsen. Om het model te sturen zullen metingen worden uitgevoerd van:
 - o lichtintensiteit (globale straling en of fotosynthetisch actieve straling)
 - o relatieve luchtvochtigheid
 - o luchttemperatuur
 - o enkele parameters die te maken hebben met de voor de planten beschikbare hoeveelheid water
Hiervan zullen zo mogelijk ter plaatse enkele metingen worden uitgevoerd.

De resultaten van de modelberekeningen zullen, voor wat betreft de concentratie van stoffen zoals NO₂ en fijn stof, direct met elkaar worden vergeleken. Het betreft hier een eenvoudige vergelijking waarbij de gemeten concentratie op een bepaalde plaats wordt vergeleken met de met het model berekenende concentratie. De vergelijking geeft inzicht in de kwaliteit van het model.

De gemeten achtergrondconcentratie van stoffen (de concentratie stroomopwaarts van de weg) zal dienen als invoer voor de modelberekeningen.

Bijlage B

Validatie en illustratie van gebruik van Pan-Air

B.1 Lijst van validatieexperimenten en -literatuur

Desert Tortoise Series Data Report: 1983 Pressurized Ammonia Spills. Goldwire, H.C. Jr, T.G. McRae, G.W. Johnson, D.L. Hipple, R.P. Koopman, J.W. McClure, L.K. Morris and R.T. Cederhall, 1985

http://www.fluidyn.com/validation/Dense_Gas.pdf UCID 20562, Lawrence Livermore National Laboratory; Livermore, California. 5: 294-312.

Validation of Mathematical Models Using Wind-Tunnel Data Sets for Dense Gas Dispersion in the Presence of Obstacles. Havens, J., T. Spicer, H. Walker and T. Williams, 1995.

http://www.fluidyn.com/validation/Dense_Gas.pdf University of Arkansas, 8th International Symposium-Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries; Antwerp, Belgium.

Atmospheric Dispersion from Elevated Sources in an Urban Area: Comparison Between Tracer Experiments and Model Calculations. Gryning, S.E. and E. Lyck, 1984. J. of Climate and Appl. Meteor., 23:651-660.

fluidyn - Super PANACHE AIR POLLUTION MODEL VALIDATION COPENHAGEN.

fluidyn - Super PANACHE AIR POLLUTION MODEL VALIDATION KINCAID.

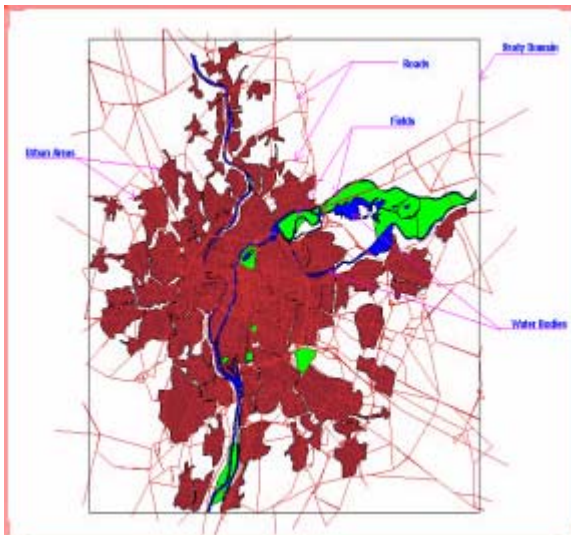
fluidyn - Super PANACHE AIR POLLUTION MODEL VALIDATION LILLESTROM. Tripathi, S., 1994. Evaluation of fluidyn PANACHE on Heavy Gas Dispersion Test Case. Seminar on Evaluation of Models of Heavy Gas Dispersion Organized by European Commission; Mol, Belgium. Organized by European Commission; Mol, Belgium.

Validation of fluidyn-Panroad Model using a measurement data set made on a motor way. Lise, J and L. Carrie, 1997. Presented at 4th International Scientific Symposium Transport & Air Pollution, Avignon, France.

B.2 Voorbeeldberekening Lyon

Om de toepassing van Pan-Air te illustreren wordt een berekening gegeven voor Lyon met een wegennetwerk van 4700 wegen en tal van grote industriecomplexen. MEER TEKST VOLGT

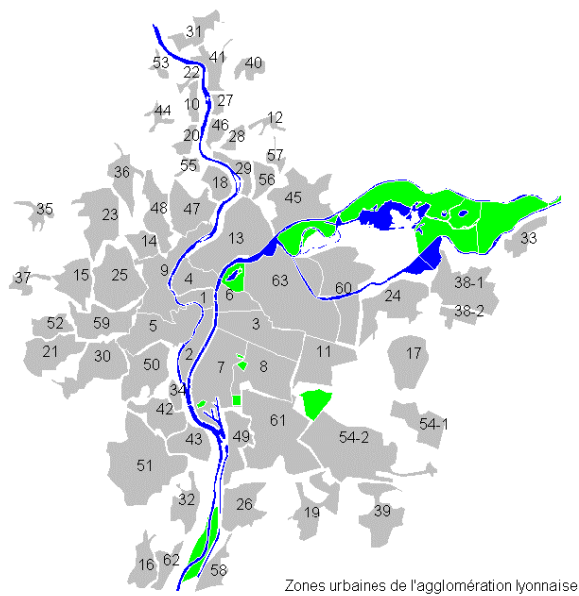
(Amita Tripathi, Transoft International, 2004)



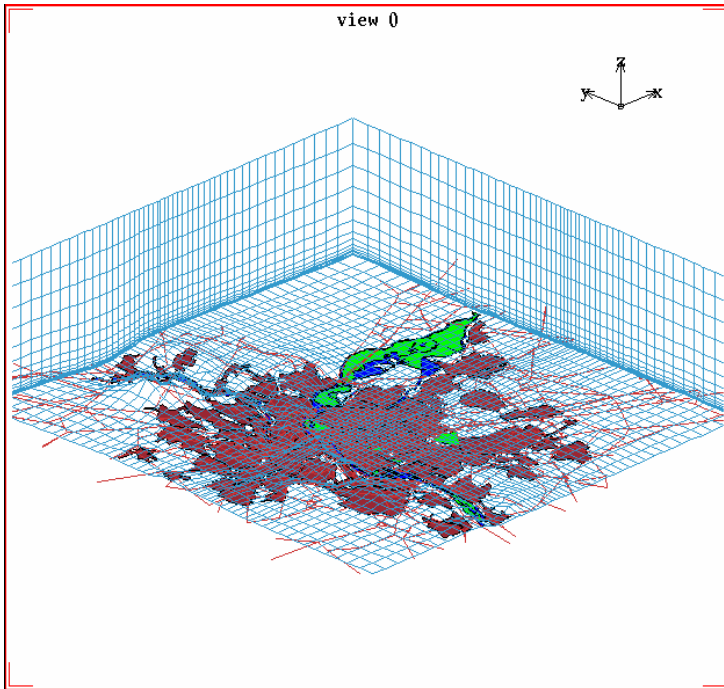
Terrein van de studie (domein is 28x30 km met een hoogte van 1300m)



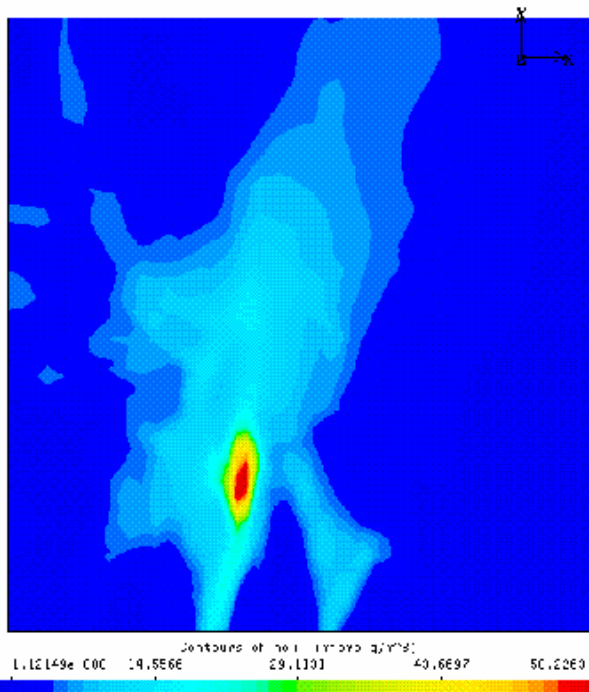
Het wegennetwerk meegenomen in de studie



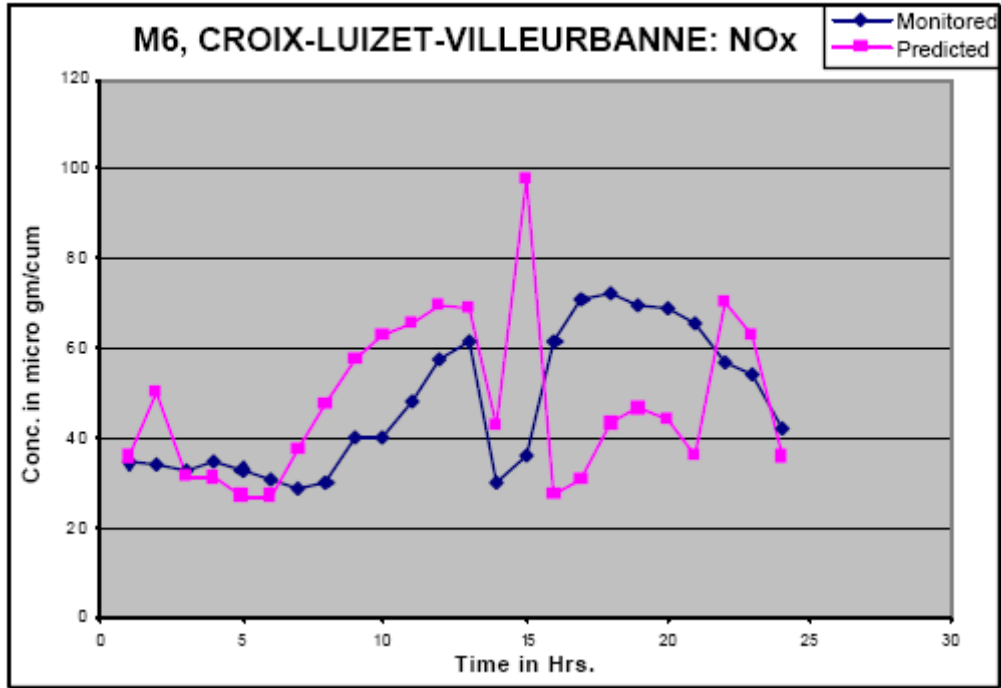
De industriële bronnen. Grote bronnen zijn meegenomen als aparte puntbronnen. De kleinere inclusief huishouden zijn meegenomen als oppervlaktebronnen zoals in figuur aangegeven.



Rekenraster over Lyon. Merk op dat het rooster de topografie volgt.



NOx concentratie aan de grond voor het 2^e uur van de simulatie



24 gemodelleerde uurlijke NOx berekeningen vergeleken met metingen. Voor een rechtstreekse vergelijking zonder verdere middelingen of statistische bewerking is de overeenkomst opmerkelijk te noemen.