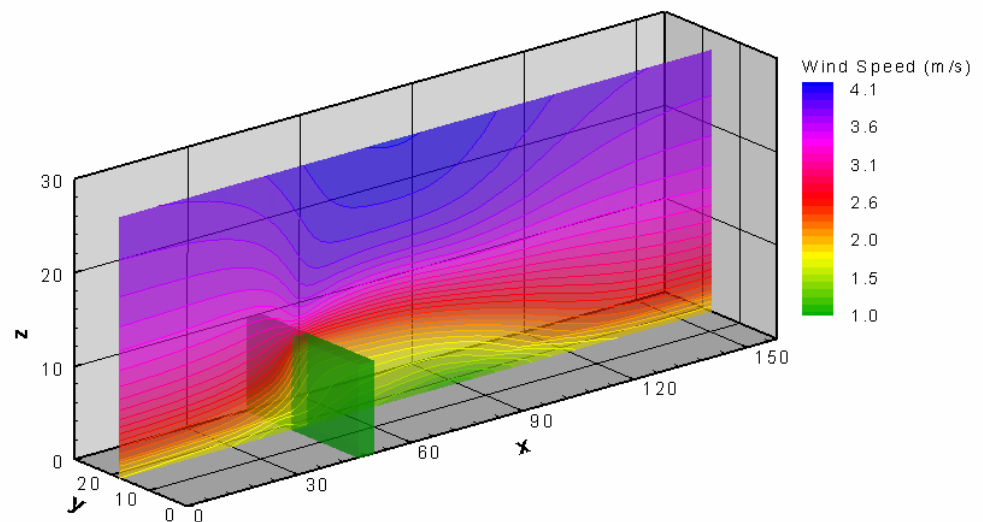


Voorstudie ten behoeve van het uitvoeren van een
pilot project langs rijkswegen:

*Update en gevoeligheidsanalyse van de vegetatiemodule
in het ENVI-met model*

Eindrapport



Jean Vankerkom, Bart De Maerschalc,
Stijn Janssen en Fred Tonneijck



Studie uitgevoerd in opdracht van
Rijkswaterstaat / DVS
December 2007



Colofon

- 1. Rapportnummer**
DVS-2008-001
- 2. Serienummer**
-
- 3. Ontvanger catalogus nummer**
-
- 4. Titel en ondertitel**
Vorstudie ten behoeve van het uitvoeren van een pilot project langs rijkswegen:
Update en gevoeligheidsanalyse van de vegetatiemodule in het ENVI-met model
Eindrapport
- 5. Datum rapport**
20 december 2007
- 6. Code uitvoerende organisatie**
VITO – Triple E
- 7. Schrijvers**
Jean Vankerkom, Bart De Maerschallck, Stijn Janssen en Fred Tonneijck
- 8. Nr. rapport uitvoerende organisatie**
VITO rapport: 2008/IMS/R/15
- 9. Naam en adres opdrachtnemer**
Combinatie VITO – Triple E
Boeretang 200
2400 Mol
België
- 10. Projectnaam**
Prijsvraag Vegetatie voor betere luchtkwaliteit: meten is weten
- 11. Contractnummer**
bestelbon 4500092041 – pos. nr. 00010
- 12. Naam en adres opdrachtgever**
Rijkswaterstaat
DGP & VROM
- 13. Type rapport**
Onderzoeksrapport
- 14. Code andere opdrachtgever**
-
- 15. Opmerkingen**
-
- 16. Trefwoorden**
IPL, luchtkwaliteit, vegetatiemodule, ENVI-met
- 17. Referaat**
Dit rapport beschrijft in detail de vegetatiemodule van het ENVI-met model. Dit microschaal model kan ingezet worden voor de berekening van het effect van vegetatie elementen op de luchtkwaliteit langs snelwegen. In het rapport wordt een eerste aanzet gegeven om dit effect te kwantificeren. In een gevoeligheidsanalyse worden verschillende configuraties van het groenscherm doorgerekend en worden de verschillen besproken. Aansluitend hierop worden de randvoorwaarden opgesteld die het ENVI-met model stelt aan een meetcampagne.
- 18. Aantal blz.**
50
- 19. Prijs**
-
- 20. Acceptatie projectleider**
A. van den Burg
- 21. Acceptatie programma Manager IPL**
Drs. R. Nijland
- 22. Acceptatie afdelingshoofd IP**
Ir. G. Debeus
- 23. Acceptatie directeur Infrastructuur**
Drs. Ing. A. L. J. Sprangers

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
2	Vegetatiemodule ENVI-met.....	6
2.1	Vegetatie databank	6
2.2	Structurele eigenschappen van de vegetatie	6
2.3	Procesmatige eigenschappen.....	7
2.3.1	Sedimentatie.....	8
2.3.2	Depositie	8
2.4	Atmosferische chemie.....	13
3	Gevoeligheidsanalyse	14
3.1	Inleiding	14
3.2	Modelconfiguratie.....	14
3.3	Afstand van beplanting tot de bron	17
3.4	Hoogte van de beplanting	20
3.5	Breedte van de beplanting	24
3.6	Densiteit (Leaf Area Density).....	27
3.7	Type boom: Loofbomen versus Naaldbomen	31
3.8	Depositie en depositieweerstanden	37
4	Besluit	42
5	Referenties.....	43

1 INLEIDING

Ter voorbereiding van het IPL project *Vegetatie en Luchtkwaliteit* (verder aangeduid met IPL project) dat door Rijkswaterstaat (DVS) wordt aanbesteed, hebben VITO en Triple E in de zomer en najaar van 2007 een "Voorstudie IPL" uitgevoerd. In dit rapport worden de werkzaamheden van deze voorstudie beschreven.

De doelstellingen van de voorstudie zijn drieledig.

1. Ter ondersteuning van de opmaak van de prijsvraag *Vegetatie en Luchtkwaliteit* wordt een bijlage opgesteld waarin de minimale randvoorwaarden zijn beschreven die door het ENVI-met model worden opgelegd aan een meetcampagne. Hierin wordt vastgesteld welke essentiële parameters moeten opgemeten worden in de proeftuin opdat aan alle noodzakelijke randvoorwaarden van het ENVI-met model wordt voldaan. Hierbij werd zowel naar de parameters van het groenscherm gekeken als naar de noodzakelijke meteorologische en chemische achtergrondwaarden. Daarnaast wordt ook aangegeven welke parameters gemeten moeten worden om een optimale validatie van het model uit te voeren.
2. Ter voorbereiding van het IPL project wordt in deze voorstudie de vegetatiemodule doorgelicht en up-to-date gemaakt. Er wordt een databank aangelegd met de relevante parameters van het model en de overeenkomstige waarden voor verschillende types groen. De parameterwaarden zijn bepaald op basis van beschikbare literatuur. Deze databank kan tijdens het IPL project ten volle benut worden.
3. De databank die in deze voorstudie is opgesteld, is vervolgens gebruikt om enkele gevoeligheidsanalyses met het ENVI-met model uit te voeren. Tijdens deze gevoeligheidsanalyse zijn een aantal verschillende configuraties van het groenscherm doorgerekend bij standaard meteorologische omstandigheden. Doel van deze analyse is om meer inzicht te krijgen in de processen en een eerste afbakening te maken van de effecten die kunnen verwacht worden bij de verschillende typen groenschermen.

De bijlage aan de prijsvraag *Vegetatie en Luchtkwaliteit* werd begin augustus reeds aan Rijkswaterstaat overgemaakt. Voor de volledigheid is ze in dit rapport ook als BIJLAGE A opgenomen.

De beschrijving van de uitgebreide vegetatiemodule is terug te vinden in §2. De gevoeligheidsanalyse wordt besproken in §3. Als besluit wordt in §4 de voorstudie samengevat.

2 VEGETATIEMODULE ENVI-MET

De uitgebreide vegetatiemodule van ENVI-met is in staat om in hoge mate van detail de impact te beschrijven van beplantingen met verschillende karakteristieken op de lokale luchtkwaliteit. Om deze interactie zo goed mogelijk in rekening te brengen, zijn de belangrijkste interactieprocessen tussen vegetatie enerzijds en deeltjes en gassen anderzijds opgenomen in de vegetatie module. Hierbij wordt zowel de absorptie van gassen door de stomata van het blad als de afvangst van deeltjes op het bladoppervlak in rekening gebracht. Hieronder worden de betrokken processen in detail toegelicht.

2.1 VEGETATIE DATABANK

In het ENVI-met model zijn enkele types van vegetatie zoals gras, maïsplanten, struiken, loof- en naaldbomen gedefinieerd in de vegetatiedatabank. Hieraan kunnen zeer gemakkelijk bijkomende types vegetatie toegevoegd of aangepast worden. Een vegetatie element wordt hierbij niet als plantsoort als dusdanig gedefinieerd maar i.f.v. het type (gras, loof- en naaldbomen), de bladgrootte en het CO₂-metabolisme (C3, C4). De twee belangrijkste varianten voor het CO₂ metabolisme van planten, namelijk C3 en C4 types, zijn in ENVI-met voorzien. Deze twee types hebben een verschillende impact op de stomatale weerstand die op zijn beurt van belang is bij de opname van gassen door het blad.

Naast deze karakteristieken zijn natuurlijk ook de structurele eigenschappen van de vegetatie (zie §2.2) zoals hoogte, breedte, Leaf Area Density (LAD)... bepalend voor de beschrijving van het vegetatie element.

Door de structurele eigenschappen van de planten te definiëren, het CO₂ metabolisme te kiezen en het type en bladgrootte van planten aan te duiden, kan een benadering van de plantensoort gemaakt worden.

2.2 STRUCTURELE EIGENSCHAPPEN VAN DE VEGETATIE

De structurele eigenschappen van de vegetatie zijn belangrijk om de interacties met de atmosfeer te modelleren. In ENVI-met wordt de structuur van een vegetatie element allereerst bepaald op basis van de hoogte en de variabele breedte van de kruin. Daarnaast geeft de Leaf Area Density (LAD) de dichtheid van de kruin weer. De LAD is het gemiddeld bladoppervlak per eenheid van volume (m²/m³). In de bijlage wordt in meer detail beschreven hoe deze grootte in ENVI-met wordt gebruikt. Naast de kruin wordt ook een beschrijving van de wortel meegenomen om een inschatting te kunnen maken over het bodemvocht dat de vegetatie kan opnemen. Aangezien deze parameter minder kritisch is voor de beschrijving van de interactie met de atmosfeer, kan een beroep gedaan worden op een aantal standaard Root Area Density (RAD) profielen die beschikbaar zijn in de literatuur.

In onderstaande Tabel 1 wordt een overzicht gegeven van de structurele parameters van de vegetatie waarmee de interactie van deze vegetatie met de

atmosfeer in ENVI-met wordt beschreven. In deze tabel wordt naast de notatie, de beschrijving en de eenheid ook aangegeven hoe deze in het IPL project zal bepaald worden. Zoals hieruit blijkt, zal enkel voor de geometrische aspecten van de vegetatie een beroep worden gedaan op metingen in de proeftuin zelf. Voor de meeste andere parameters kan gesteund worden op bestaande literatuur.

Tabel 1: Parameters van de ENVI-met vegetatiemodule die de structurele eigenschappen bepalen

Notatie	Parameter	Eenh.	Waarde	Te meten in IPL project
LAD(z)	(normalised) leaf area density	m ² /m ³	-	Ja, eventueel visueel via optische porositeit
RAD(-z)	(normalised) root area density	m ² /m ³	-	Breuer, 2002
breedte	width of the crown	m	-	Ja
Z _p	total plant height	m	-	Ja
-Z _r	depth root zone	m	-	Breuer, 2002

Naast de parameters die betrekking hebben op de structurele eigenschappen van een vegetatie element, zijn er een aantal parameters die de interactie beschrijven van de vegetatie met het windveld en de korte en langgolvlige straling.

De mechanische *drag coefficient* $c_{d,f}$ bepaalt in welke mate de vegetatie een invloed heeft op de productie en de dissipatie van turbulente energie. In ENVI-met is hiervoor de methodologie van Liu et al. (1996) geïmplementeerd. De oppervlakte albedo en de emissiviteit van (vegetatie) oppervlaktes spelen een rol bij de bepaling van de korte en langgolvlige stralingsbalans.

Tabel 2: Parameters van de ENVI-met vegetatiemodule die betrekking hebben op de interactie met de stralingsbalans en het windveld.

Notatie	Parameter	Eenh.	Waarde	Referentie
$c_{d,f}$	mechanical drag coefficient at plan elements	-	0.2	Liu (1996)
a_s	short wave surface albedo	-	-	user defined
ϵ_s	emissivity of the surface (walls)	-	0.9	Bruse, 1998
ϵ_f	emissivity of the foliage	-	0.96	Bruse, 1998

2.3 PROCESMATIGE EIGENSCHAPPEN

Voor de verspreiding van gassen en deeltjes in het modeldomein wordt een beroep gedaan op de advectie-diffusie vergelijkingen van de CFD module van ENVI-met. De beschrijving hiervan valt buiten het bestek van deze studie en wordt in detail beschreven door Bruse en Fler (1998).

Naast de verspreiding, berekent ENVI-met de sedimentatie en de depositie van de polluenten op de verschillende oppervlakten. Hierbij wordt rekening gehouden met de turbulenties veroorzaakt door obstakels zoals gebouwen en planten maar ook met de opname van gassen door de stomata van de bladeren.

2.3.1 Sedimentatie

De sedimentatie van deeltjes is afhankelijk van de deeltjesgrootte D_p en de dichtheid ρ_χ van het fijn stof en de turbulentie in de atmosfeer. In het model wordt deze snelheid berekend op basis van de uitdrukking:

$$v_s = \left(\frac{4D_p g C_c}{3C_d} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

waar C_c een slip-correction factor is afhankelijk van de deeltjes diameter D_p en de vrije weglengte van luchtmoleculen. C_d is de *drag force* op het deeltje, afhankelijk van de lokale turbulentie en functie van het Reynolds getal Re . Voor een sferisch deeltje wordt Re gegeven door:

$$Re = \frac{\rho_\chi v_s D_p}{\mu}, \quad (2)$$

waarbij μ de viscositeit van lucht is ($1.8 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$). Deze set van vergelijkingen wordt op een iteratieve manier opgelost (Seinfeld and Pandis, 1990; Bruse, 2007) om een oplossing voor de sedimentatiesnelheid te bekomen.

2.3.2 Depositie

Voor de depositiesnelheid v_d van deeltjes en gassen naar bladoppervlakken wordt een weerstandsschema gebruikt waarin zowel de aerodynamische weerstand op bladniveau r_a , de sublaag (grenslaag) weerstand r_b , als een bijkomende oppervlakte weerstand r_t in verwerkt zijn:

$$v_d = \frac{1}{r_a + r_b + r_t} \quad (\text{voor gassen}), \quad (3)$$

$$v_d = \frac{1}{r_a + r_b + r_a r_b v_{s,0}} + v_{s,0} \quad (\text{voor deeltjes}). \quad (4)$$

Hierbij is $v_{s,0}$ de loodrechte snelheidscomponent dicht bij het oppervlak. Deze waarde is een combinatie van de sedimentatiesnelheid en de horizontale windsnelheid en is afhankelijk van de oriëntatie van bladeren. Om dit in rekening te brengen, wordt een *leaf inclination factor* f_i ingevoerd die standaard op 0.5 staat en overeen komt met een random oriëntatie.

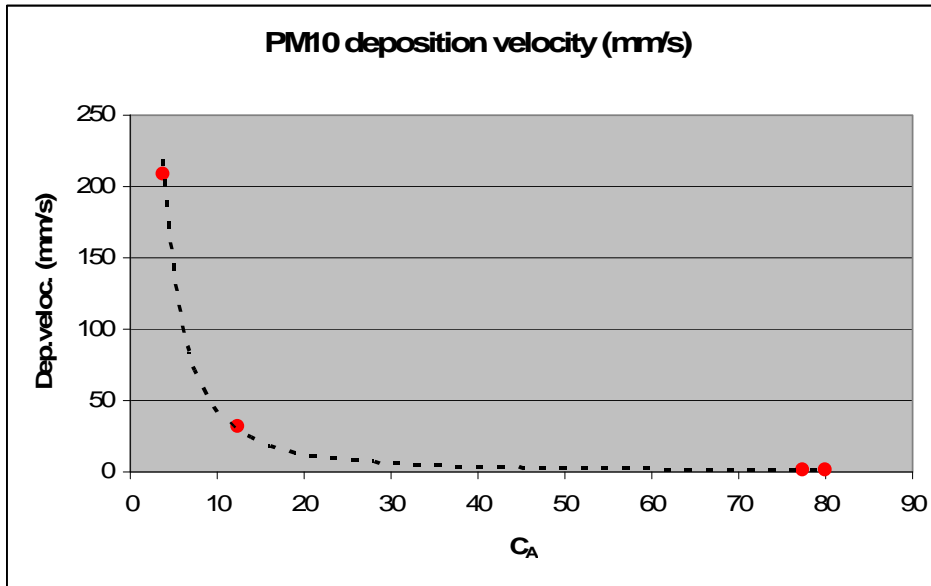
Voor de berekening van de eigenlijke depositie van deeltjes en gassen wordt de snelheid v_d vermenigvuldigd met de concentratie en de LAD in de bewuste gridcel. Daarnaast wordt ook de leaf filtering capacity f_{cap} in rekening gebracht. Deze waarde varieert van 0 voor een vuil blad naar 1 voor een vers, zuiver blad. In ENVI-met wordt f_{cap} standaard op 1 gezet.

Aerodynamische weerstand

Voor de berekening van de aerodynamische weerstand r_a van een oppervlak voor gassen en deeltjes wordt in ENVI-met een analoog principe gebruikt als voor het warmte transport. Hierbij wordt de weerstand direct gekoppeld aan de turbulente warmte uitwisselingscoëfficiënt aan de verschillende oppervlakken. Voor de aerodynamische weerstand aan bladoppervlakken wordt een alternatieve uitdrukking gebruikt waarin ook de typische bladdiameter in rekening wordt genomen (Branden, 1982):

$$r_a = A \sqrt{\frac{D}{\max(u, 0.05)}} = C_a \sqrt{\frac{1}{\max(u, 0.05)}} \quad (5)$$

Hierbij is u de windsnelheid aan het bladoppervlak, D de typische bladdiameter en A de plantspecifieke aerodynamische weerstand. Hierbij moet opgemerkt worden dat deze aerodynamische weerstand op het niveau van het bladoppervlak niet mag verward worden met de aerodynamische weerstand die gebruikt wordt in meso-schaal luchtkwaliteitmodellen voor de depositie van deeltjes en gassen in de (subgrid) canopy. De coëfficiënt $C_a = A\sqrt{D}$ zal verder in de gevoeligheidsanalyse gebruikt worden om het effect van deze aerodynamische weerstand op bladniveau in te schatten. Figuur 2.1 geeft een grafische voorstelling van de invloed van deze parameter op de depositiesnelheid van stofdeeltjes. Loofbomen hebben in ENVI-met standaard een C_a waarde van 77 (Schilling, 1990). Afhankelijk van de waarde die als 'typical leaf diameter' D genomen wordt, zou de C_a waarde van loofbomen kunnen variëren tussen 40 à 80. Op basis van de resultaten in Figuur 2.1 kan men besluiten dat tussen loofbomen de depositiesnelheid voor deeltjes weinig zal verschillen. Daarentegen hebben gras en naaldbomen een standaard C_a waarde rond 12. Zoals uit de figuur kan opgemaakt worden, bevindt deze waarde zich op een veel gevoeliger plaats op de curve, namelijk aan het begin van het exponentiële gedeelte. Kleine variaties aan deze parameter kunnen dan van grote invloed zijn op de depositiesnelheid (zie §3.7). Een C_a waarde van 4 wordt b.v. verkregen als voor de typische bladdiameter van de naaldboom een waarde van 2 mm (ongeveer de diameter van een naald) i.p.v. 2 cm (standaard in ENVI-met, ongeveer de lengte van een naald) genomen wordt. Op basis van de beschikbare literatuur kan niet worden uitgemaakt of voor D de diameter dan wel de lengte van de naald in rekening moet worden gebracht in deze formule. In de gevoeligheidsanalyse zijn daarom beide opties meegenomen. Op basis van de Figuur 2.1 wordt het duidelijk dat de C_a parameter van de aerodynamische weerstand op bladniveau een belangrijke (exponentiële) impact kan hebben op de depositiesnelheid. Gezien de onzekerheid over de range van deze grootte is verder onderzoek hiernaar absoluut aangewezen.



Figuur 2.1: Effect van de factor $C_a = A\sqrt{D}$ op de maximale depositie snelheid van PM_{10} .

Quasi laminaire grenslaagweerstand

De sublaag weerstand r_b is een bijkomende weerstand die veroorzaakt wordt door de quasi laminaire stroming over het bladoppervlak (Seinfeld, 1990). Voor gassen wordt deze weerstand berekend op basis van de wrijvingsnelheid u_* en het Schmidt getal Sc :

$$r_b = \frac{1}{u_*} 5 \cdot Sc^{2/3}, \quad (6)$$

dat op zijn beurt bepaald wordt door de Brownse diffusiecoëfficiënt D_χ van de betrokken pollutant en de kinematische viscositeit van lucht ν :

$$Sc = \frac{\nu}{D_\chi}. \quad (7)$$

Een overzicht van Brownse diffusiecoëfficiënten voor typische pollutanten wordt gegeven in Seinfeld (1990).

Voor deeltjes wordt bij de bepaling van deze weerstand naast de Brownse diffusie ook rekening gehouden met de mogelijkheid voor impact t.g.v. de inertie van de deeltjes. Om dit effect in rekening te brengen wordt gebruik gemaakt van het Stokes getal van de quasi laminaire grenslaag:

$$r_b = \frac{1}{u_* (Sc^{-2/3} + 10^{-3/St})}, \quad (8)$$

waarbij het Stokes getal St gegeven wordt door:

$$St = \frac{\nu_s u_*^2}{g\nu}. \quad (9)$$

Oppervlakteweerstand

De bijkomende oppervlakte weerstand r_t wordt enkel toegepast voor de gasvormige deeltjes. Hierbij wordt er onderscheid gemaakt tussen onbegroeide of verharde oppervlak, wateroppervlak of vegetatie. Voor wat betreft vegetatie kan vervolgens ook nog eens rekening worden gehouden met de mogelijkheid dat een belangrijke fractie $f_w = (W_{dew} / W_{dew,max})^{2/3}$ van het plantoppervlak vochtig is, waardoor de oppervlakte weerstand van water in rekening moet worden gebracht:

$$r_{t,plant} = (1 - f_w) \cdot r_s^* + f_w \cdot r_{t,water} \quad (10)$$

Gezien de grote onzekerheid wordt op dit moment f_w in het ENVI-met model op nul gesteld.

Voor de droge fractie bladoppervlak wordt de gemodificeerde stomatale weerstand r_s^* gebruikt die zowel een bijdrage van de stomatale als de mesophyle weerstand bevat. Beide weerstanden, stomataal en mesophyl, hebben immers een belangrijke impact op de absorptie van gassen (Seinfeld, 1990):

$$r_s^* = r_s \frac{D_{H_2O}}{D_x} + r_{meso} \quad (11)$$

waarbij D_{H_2O} en D_x de moleculaire diffusiviteit van water en van de bestudeerde stof zijn (voor getabuleerde waarden zie: Bruse 2007, Seinfeld 1990). De mesophyle weerstand beschrijft het eigenlijke reactieve opnameproces van de gassen door de huidmondjes en wordt berekend als (Seinfeld 1990):

$$r_{meso} = \frac{1}{3.3 \cdot 10^4 H_i^* + 100 f_0^i} \quad (12)$$

waarbij H_i^* Henry's law constante is en f_0^i de genormaliseerde reactiviteit. Waarden voor de relevante gassen zijn overgenomen van Seinfeld (1990).

Gezien het grote belang van de stomatale weerstand r_s bij de interactie met luchtvervuiling, beschikt ENVI-met over een eenvoudig en een geavanceerd model voor de berekening van deze weerstand. De eenvoudige formulering is gebaseerd op oud werk van Deardorff (1978):

$$r_s = r_{s,min} \left[\frac{R_{sw,max}}{0.03 R_{sw,max} + R_{sw}} + \left(\frac{\eta_{wilt}}{\eta} \right)^2 \right] \quad (13)$$

Hierbij is $R_{sw,(max)}$ de (maximale) kortgolvlige straling, η het beschikbare grondwater en η_{wilt} een bomentype afhankelijke kritische waarde waarbij

droogtestress optreedt. $r_{s,min}$ is de minimale stomatale weerstand en kan afhankelijk van het type vegetatie variëren tussen 200 s/m voor grassen en 400 s/m voor loofbomen (Deardorff, 1978). Voor naaldbomen zou een nog hogere waarden voor de stomatale weerstand gebruikt gevonden worden (Breuer 2002).

Een alternatieve en veel complexere module voor de berekening van de stomatale weerstand wordt gegeven door Jacobs (1994). In deze zogenaamde A-g_s module wordt ook rekening gehouden met het beschikbare bodemvocht en de stralingsintensiteit maar daarnaast wordt ook de CO₂ assimilatie in rekening gebracht. Deze grootheden bepalen in belangrijke mate de korte- (en lange-) termijn fluctuaties van de stomata en zijn essentieel voor een goede beschrijving van de wisselwerking tussen de vegetatie en de gasvormige pollutanten. De volledige beschrijving van deze module gaat buiten het bestek van deze studie. Een samenvatting van de methodologie wordt gegeven door Bruse (2004). Voor de volledigheid zijn de parameters van het A-g_s model van Jacobs opgenomen in Tabel 4.

Tabel 3 beschrijft de procesmatige parameters van de ENVI-met vegetatiemodule met hun eenheden, hun waarden en oorsprong.

Tabel 3: Parameters i.v.m. procesmatige eigenschappen van de ENVI-met vegetatiemodule

Notatie	Parameter	Eenh.	Waarde	Referentie
f_l	leaf inclination factor	-	0.5 (random waarde)	
f_{cap}	leaf filtering capacity	-	0 (dirty) 1 (fresh)	Bruse, 1998
D	typical leaf diameter	cm	Loof: 5 – 15 Naald: 0.2 - 2 Gras: 2	-
A	aerodynamic resistance parameter	s ^{0.5} /m	Loof: 200 Naald: 87 Gras: 200	Schilling, 1990 Naot, 1989
C_a	generalised aerodynamic resistance parameter ($C_a = A\sqrt{D}$)	s ^{0.5} /m ^{0.5}	Loof: 77.46 Naald: 12.3	-
$r_{s,min}$	minimal stomatale resistance	s/m	Loof: 400 Naald: 500	Deardorff, 1978 Breuer, 2002
$W_{dew,max}$	maximum value for dew on the leaf	kg/m ²	0.2	Bruse, 1998

Tabel 4: Parameters van het A-g_s model van Jacobs voor de stomatale weerstand. Alle parameterwaarden zijn overgenomen van Jacobs (2004).

Notatie	Parameter	Eenh.	Waarde	Opmerking
Γ	compensation Point	ppm	C3: 45 C4: 2.8	Niet aan de orde voor ozon en NO ₂ .
g_m	mesophyll conductance	mm/s	C3: 7.0 C4: 17.5	
$A_{m,max}$	max. photosynthetic rate	mg/(m ² s)	C3: 2.2 C4: 1.7	
ϵ_0	max. quantum efficiency	mg/J PAR	C3: 0.017 C4: 0.014	
ϕ_0	stomata response to humidity	-	C3: 0.85 C4: 0.50	
g_c	cuticular conductance	mm/s	0.25 (voor CO ₂)	Ozon en NO ₂ worden niet via de cuticula opgenomen. Voor deze componenten is de conductance gelijk aan nul (Lendzian en Kerstiens, 1991).
D_{max}	max. saturation deficit of humidity	g/kg	45	

2.4 ATMOSFERISCHE CHEMIE

Het ENVI-met model laat toe om de verspreiding en depositie van stofdeeltjes en gassen in de lucht te simuleren.

Stofdeeltjes worden door hun diameter (μm) en dichtheid (g/cm^3) beschreven. Op deze manier kunnen PM₁₀, PM_{2.5} en eventueel ook andere deeltjesgrootte klassen van stofdeeltjes zoals PM₁ gemakkelijk in het model opgenomen worden. Hierbij is het belangrijk te vermelden dat de deeltjes diameter D_p een belangrijke rol speelt bij een aantal depositieprocessen (zie §2.2).

De gasvormige componenten CO₂, CO, NO, NO₂, O₃, NH₃, SO₂ en H₂O₂ zijn momenteel standaard in ENVI-met opgenomen. Bijkomende componenten kunnen echter eenvoudig toegevoegd worden, mist men over een aantal stofspecifieke parameters beschikt. VITO heeft recent een module voor de ozonchemie (NO, NO₂ en O₃) ingebouwd zodat het chemisch evenwicht tussen NO_x en O₃ kan gemodelleerd worden.

3 GEVOELIGHEIDSANALYSE

3.1 INLEIDING

Deze gevoeligheidsanalyse heeft als doel een aantal verschillende configuraties van het groenscherm door te rekenen bij standaard meteorologische omstandigheden. Hierbij is het de bedoeling om inzicht te krijgen in de processen en een eerste afbakening te maken van de effecten die kunnen verwacht worden bij de verschillende type groenschermen.

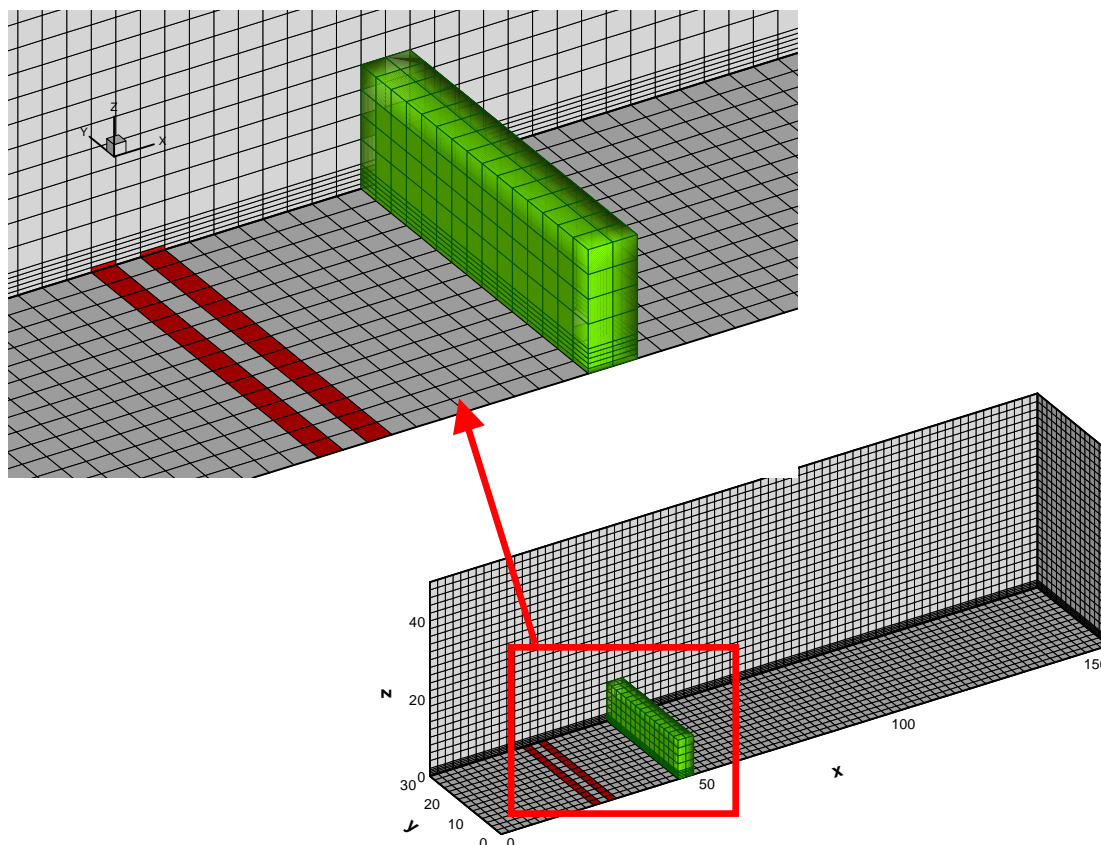
De volgende karakteristieken zijn opgenomen: afstand tussen bron en beplanting, hoogte, breedte, dichtheid en type van beplanting.

Om de impact van de verschillende parameters beter te kunnen onderscheiden, worden de andere parameters constant en zo eenvoudig mogelijk gehouden. Voor de berekening van de NO₂ concentratie wordt bijvoorbeeld geen rekening gehouden met de reactie tussen NO, NO₂ en O₃. De waarden van de verschillende invoerparameters zijn realistisch gekozen maar het is niet de bedoeling om een bepaalde situatie na te bootsen (verkeer, vochtigheid, windsnelheid ...).

3.2 MODELCONFIGURATIE

Het ENVI-met domein is voor deze studie georiënteerd met de x-as in de richting west-oost en de y-as in de richting zuid-noord. Om deze analyse uit te voeren is een domein gedefinieerd (Figuur 3.1) van 79 x 15 x 25 cellen van 2 x 2 x 2 m (158 x 30 x 50 m). De dubbele lijnbron (snelweg) bevindt zich tussen x = 24 m en x = 30 m. Het vegetatie element is gepositioneerd tussen x = 46 m en x = 50 m, tenzij anders vermeld.

De lijnbronnen, alsook de vegetatielijn(en) bevinden zich dus in de richting zuid-noord. De wind komt van het westen met een constante snelheid van 3 m/s op 10 m hoogte, dus van links en loodrecht op de lijnbronnen en vegetatielijn. De temperatuur, relatieve lucht- en grondvochtigheid worden ook constant gehouden en gelijk aan respectievelijk 293 K (± 20 °C), 50 % en 60 % voor de diepere lagen (50 % voor de bovenste laag tot 20 cm diepte). Het domein wordt gesitueerd op 5°9' longitude oost en 52°40' latitude noord en, behalve anders aangegeven, worden de resultaten van de situatie om 2 uur in de namiddag op een zomerse dag (23 juni) voorgesteld. De bodem heeft over de hele oppervlakte dezelfde samenstelling (leemgrond) behalve voor de twee lijnbronnen waar hij met asfalt overdekt is. Nergens is hij met gras bedekt.



Figuur 3.1: 3D-plot van het rekengrid gebruikt voor de gevoeligheidsanalyse. De figuur geeft de positie weer van het groenelement (groene cellen) en de dubbele lijnbron (rood). Celdimensie is $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$ behalve de onderste lagen die in de hoogte extra verfijnd zijn: $0.4 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$.

Enkele scenario's (zie Tabel 6) met verschillende types van beplantingen werden met het ENVI-met model doorgerekend voor de drie componenten PM_{10} , CO_2 en NO_2 . De volgende karakteristieken zijn hierbij opgenomen:

- afstand tussen bron en beplanting (A)
- hoogte van beplanting (H)
- breedte van beplanting (B)
- dichtheid van beplanting (LAD) (L)
- type van beplanting (loof-, naaldbomen) (T)

Het referentie scenario "Ref" heeft geen beplanting en betreft dus een open terrein.

Als defaultwaarden van beplanting (standaard beplanting, "SPL") wordt een beplanting met loofbomen met een hoogte van 10 m, een breedte van 4 m, een constante dichtheid van $1.0 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (LAD) op een afstand van 16 m van de bron genomen (zie Tabel 6 en Figuur 3.1).

Om hoge maar toch aanvaardbare emissies te kunnen gebruiken zijn in deze oefening de emissies gebaseerd op de gemiddelde emissies op de autosnelwegen rond Antwerpen (België) zoals ze door het MIMOSA model (Vankerkom, 2005, Sleenwaert, 2006) berekend worden op basis van de COPERT III emissiefactoren verhoogd voor PM met niet-uitlaat emissies door slijtage van

banden, remmen en wegdek en door resuspensie. Aangezien het hier gemiddelde van emissies betreft, uitgestoten op verschillende wegsegmenten met variabel percentage lichte en zware voertuigen en variabele snelheden i.f.v. segmenten en tijd, kan moeilijk naar etmaalintensiteit en voertuigverdeling overgegaan worden en zijn deze emissies zeker niet representatieve voor één bepaalde wegsegment. Alhoewel ze op een te smalle breedte voorzien zijn (2 stroken van 2 m), zijn de emissies veroorzaakt door de bronlijnen vergelijkbaar met deze van een drukke snelweg, ze worden in Tabel 5 aangegeven als totaal voor de 2 stroken. Om de analyse van de resultaten te vergemakkelijken worden de emissies constant gehouden in de tijd.

Met uitzondering van de CO₂ berekeningen, zijn voor de eenvoud in deze gevoeligheidsanalyse geen achtergrondconcentraties meegenomen. De concentraties zijn dus volledig toe te schrijven aan de lijnbronnen. Zoals in de inleiding aangegeven (§ 3.1) wordt bijgevolg ook geen rekening gehouden met de reactie tussen NO, NO₂ en O₃ om de impact van de verschillende parameters beter te kunnen onderscheiden.

Tabel 5: Gebruikte emissies per pollutant (totaal te verdelen over de 2 rijstroken)

Polluent	Emissie [$\mu\text{g/s/m}$]	Emissie [g/d/m]
PM ₁₀	74.9	6.471
CO ₂	178460.0	15418.944
NO ₂	251.6	21.738

Tabel 6: Karakteristieken van de verschillende geanalyseerde scenario's in de gevoeligheidsanalyses. De (SPL) referentie beplanting, dient als vergelijking tussen de verschillende scenario's.

Scenario	Kenmerken van de beplanting				
	Afstand t.o.v. bron (m)	Hoogte (m)	Breedte (m)	LAD (m^2/m^3)	Type
Ref	-	-	-	-	-
A_8	8	10	4	1.0	loof
A_16 (SPL)	16	10	4	1.0	loof
H_2	16	2	4	1.0	loof
H_6	16	6	4	1.0	loof
H_10 (SPL)	16	10	4	1.0	loof
L_0.5	16	10	4	0.5	loof
L_1.0 (SPL)	16	10	4	1.0	loof
L_1.5	16	10	4	1.5	loof
L_var	16	10	4	hoogte afh.	loof
B_2	16	10	2	1.0	loof
B_4 (SPL)	16	10	4	1.0	loof
B_8	16	10	8	1.0	loof
B_2x2	16	10	2 x 2 (2m afst.)	1.0	loof
T_L (SPL)	16	10	4	1.0	loof
T_N	16	10	4	1.0	naald
T_T	16	10	4	1.0	test

In de volgende paragrafen worden de resultaten van de gevoeligheidsanalyse getoond en besproken. De lijngrafieken geven een vergelijking van de resultaten van de modelberekeningen op een hoogte van 2 m of 6 m. De gekleurde balken geven ter visuele controle aan waar het vegetatie element zich bevindt. Het referentiescenario ("Ref") zonder beplanting wordt altijd meegegeven en de resultaten zijn in het zwart aangegeven.

3.3 AFSTAND VAN BEPLANTING TOT DE BRON

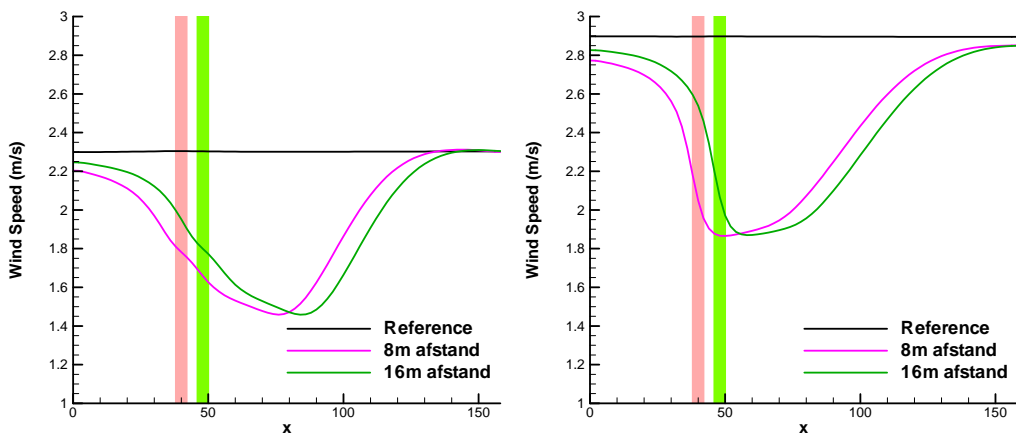
Drie scenario's zijn in deze analyse opgenomen: Ref zonder beplanting, A_8 met een beplanting op 8 m van de bron en A_16 met een beplanting op een afstand van 16 m.

De veranderingen in windsnelheid veroorzaakt door de beplanting in de twee scenario's zijn kwalitatief vergelijkbaar (Figuur 3.2). Ter hoogte van het vegetatie element wordt een snelheidsverlaging vastgesteld. De massa PM₁₀ die uit de lucht weggenomen wordt is vergelijkbaar in de twee opstellingen en minimaal (Figuur 3.8).

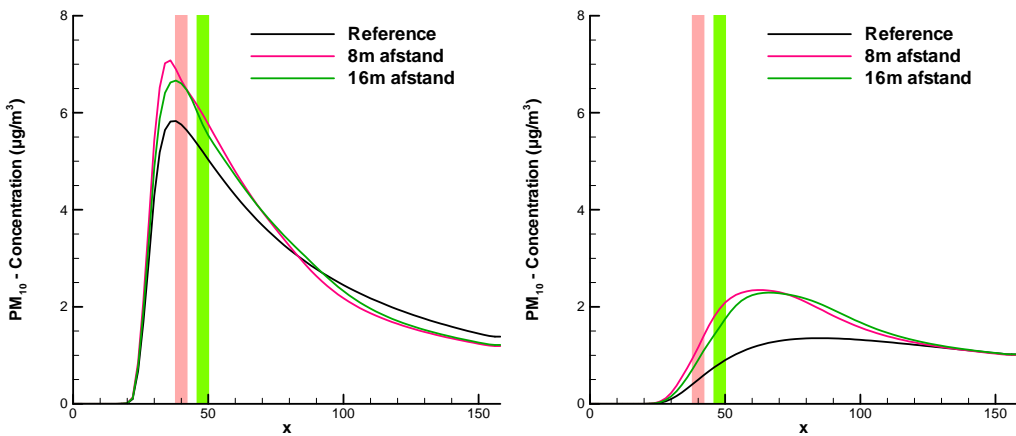
De aanwezigheid van beplanting veroorzaakt een verhoging van de concentraties vóór en juist na het obstakel (Figuur 3.3, Figuur 3.4, Figuur 3.5). Op een hoogte van 2 m boven het maaiveld, wordt er voor de drie pollutanten (PM₁₀, NO₂ en CO₂) op ± 5 keer de hoogte van het element een concentratiedaling vastgesteld (Figuur 3.6). Op 6 m hoogte boven het maaiveld is deze daling ten opzichte van het referentieniveau minder uitgesproken (CO₂) of valt het concentratieniveau terug op het referentieniveau (PM₁₀, NO₂).

Het element op 8 m veroorzaakt een grotere verhoging van de concentratie vóór de beplanting maar een snellere afname erachter t.o.v. een element op 16 m afstand (Figuur 3.7). De grootste verhogingen worden op de plek van de bron zelf genoteerd.

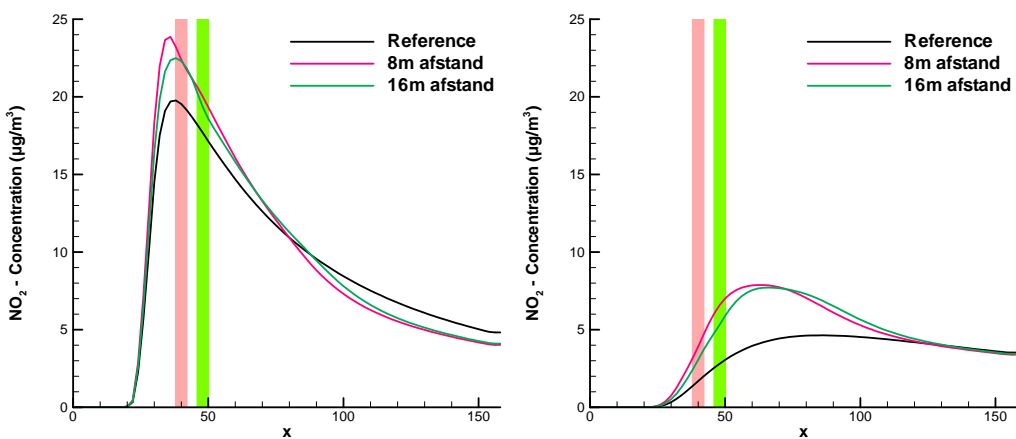
In Figuur 3.8 wordt de ruimtelijke verdeling van het lokale massa budget voor PM₁₀ weergegeven. Deze grootte is gedefinieerd als de som van de sedimentatie en de depositie en is een maat voor de hoeveelheid deeltjes die per tijdseenheid verdwijnen t.g.v. van beide verwijderingsprocessen. Op basis van deze figuur is het duidelijk dat het verwijderingsproces in het vegetatie element sterk toe neemt.



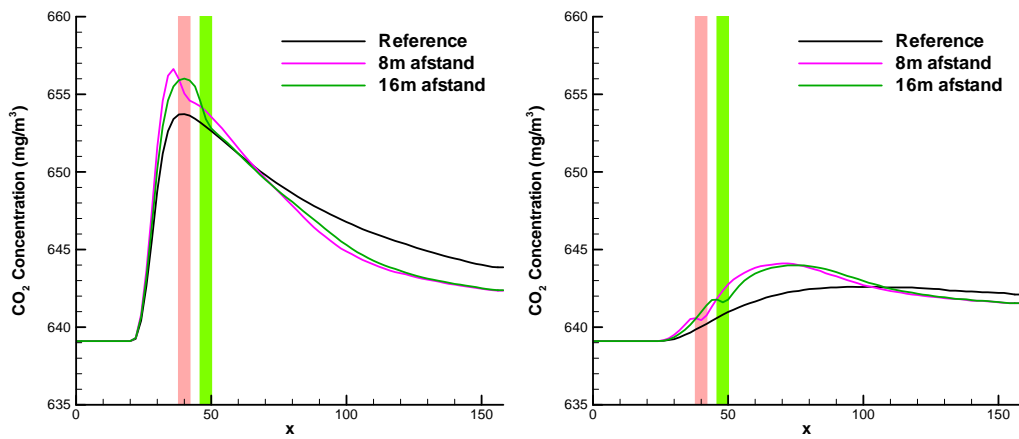
Figuur 3.2: Effect van de afstand (x) tussen bron en beplanting op de windsnelheid op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



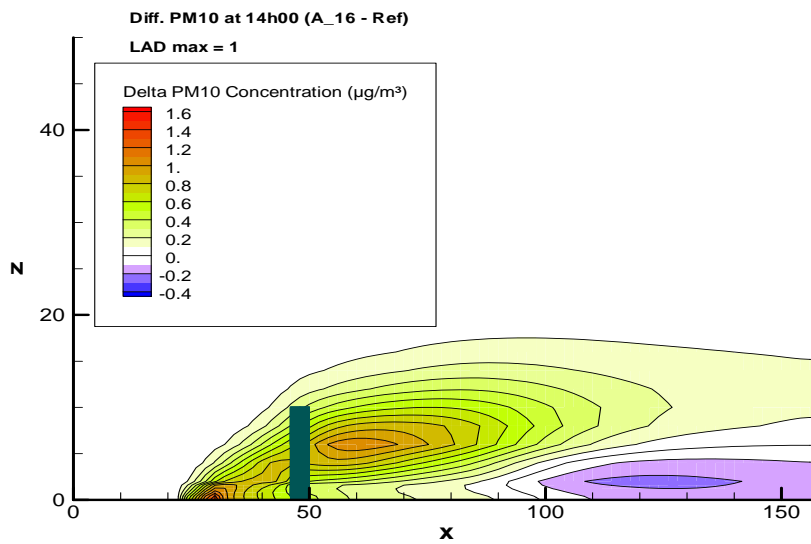
Figuur 3.3: Effect van de afstand (x) tussen bron en beplanting op de PM₁₀ concentratie op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



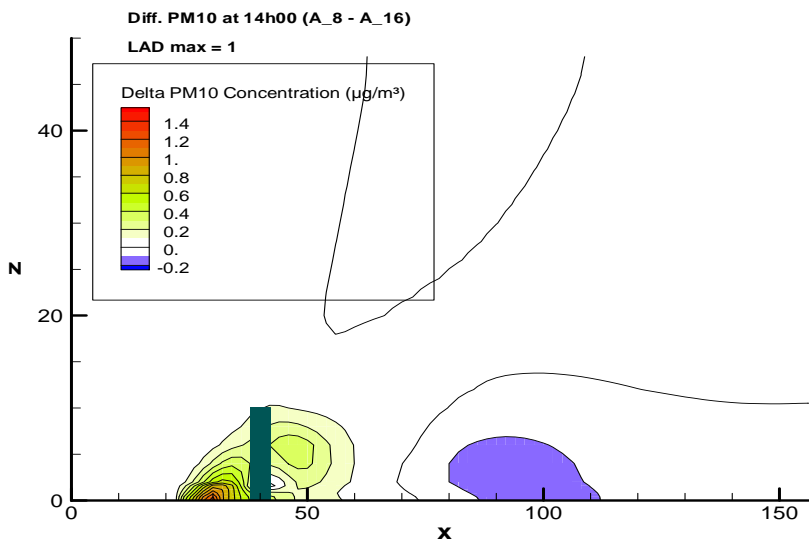
Figuur 3.4: Effect van de afstand tussen bron en beplanting op de NO₂ concentratie op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



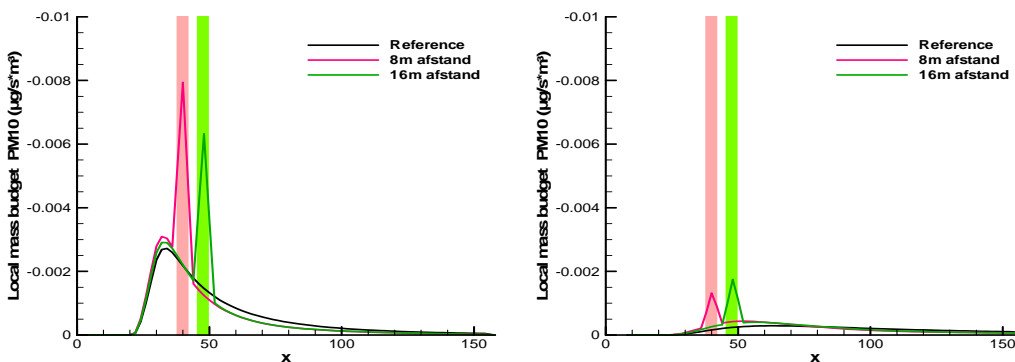
Figuur 3.5: Effect van de afstand tussen bron en beplanting op de CO₂ concentratie op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



Figuur 3.6: Ruimtelijke (x-z) verdeling van het verschil in PM₁₀ concentratie met en zonder beplanting (A₁₆ - Ref).



Figuur 3.7: Ruimtelijke (x-z) verdeling van het verschil in PM_{10} concentratie met beplanting op 8 en 16 m (A_8 – A_16).



Figuur 3.8: Effect van de afstand tussen bron en beplanting op het lokale massa budget van PM_{10} op een hoogte van 2m (linker plot) en van 6m (rechter plot).

3.4 HOOGTE VAN DE BEPLANTING

In deze analyse zijn vier scenario's opgenomen: Ref zonder beplanting, H_2, H_6 en H_10 met een 4 m brede beplanting van respectievelijk 2, 6 en 10 m hoogte op 16 m van de bron.

Hier veranderen de windsnelheden aanzienlijk met de hoogte van de beplanting. De drie curven H_2, H_6 en H_10 hebben andere vormen omwille van de veranderlijke afstanden tussen de meethoogte (2 m of 6 m) t.o.v. de bovengrens van de beplanting (Figuur 3.9).

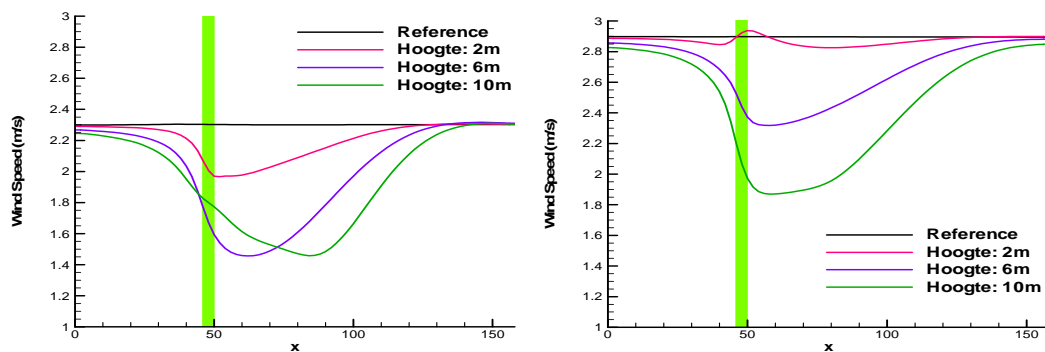
Op basis van de evolutie van de concentraties kan besloten worden dat de structuur van 10 m het meeste impact heeft op het concentratieprofiel. Een lage

structuur van 2 m heeft duidelijk minder invloed (Figuur 3.10, Figuur 3.11 en Figuur 3.12).

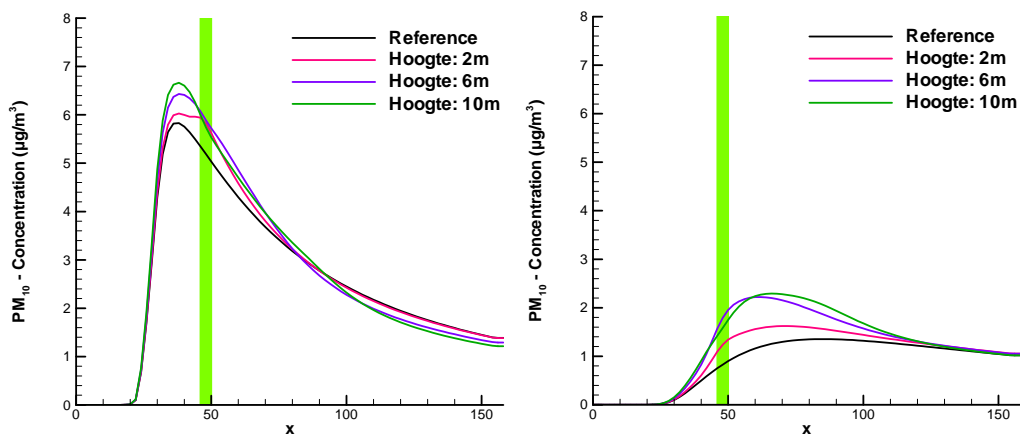
Figuur 3.13 geeft aan dat een lagere beplanting (6 m vs. 10 m) voor lagere CO₂ concentraties zorgt op een zekere afstand na de beplanting (afstand van 2 à 5 keer de hoogte). Daartegenover is er een concentratieverhoging ter hoogte van de beplanting zelf en vanaf een afstand van ± 7 maal de hoogte van de beplanting. Een zelfde fenomeen wordt ook waargenomen bij PM₁₀ en NO₂.

De aanwezigheid van een beplanting (10 m hoogte versus geen vegetatielij) zorgt voor een verlaging van de CO₂ concentraties na de beplanting (Figuur 3.14). De vermindering vindt onmiddellijk plaats tegen de grond maar bereikt een maximum op een zekere afstand van de beplanting (afstand van 5 à 10 keer de hoogte). Voor de beplanting is er een verhoging van de concentraties waar te nemen. Na de beplanting vindt ook een verhoging van de concentraties plaats maar op een zekere hoogte t.o.v. de grond. Gelijkaardige patronen worden teruggevonden bij een beplanting van 6 m hoogte (Figuur 3.15).

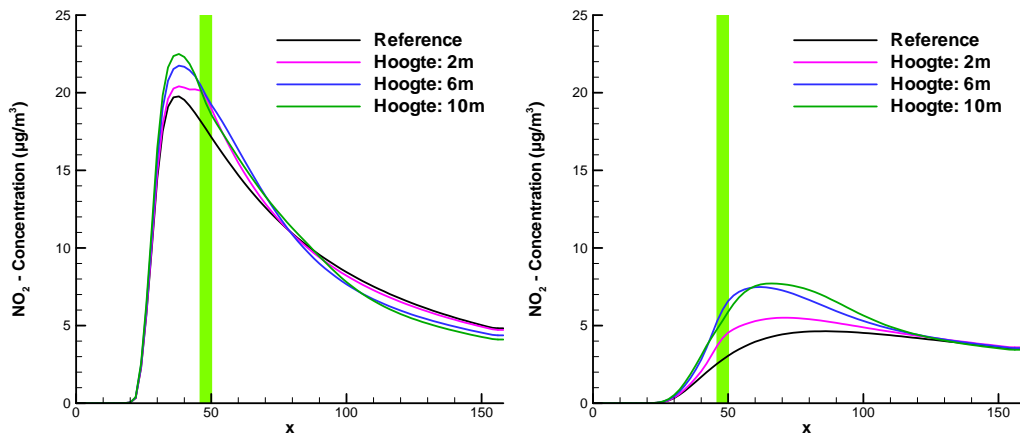
Het lokale massa budget van PM₁₀ wordt weergegeven in Figuur 3.16. Op de getoonde hoogtes (2 en 6 m boven de grond) is er weinig verschil waar te nemen tussen de beplanting met een hoogte van 6 en 10 m.



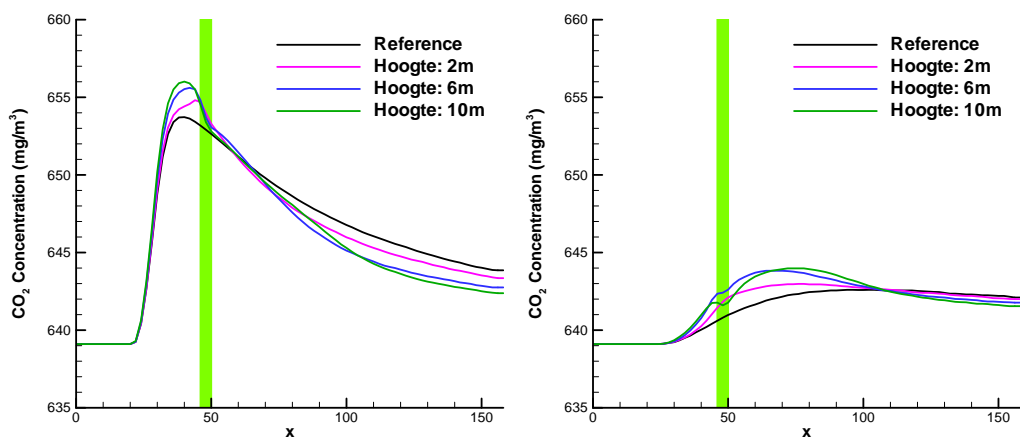
Figuur 3.9: Effect van de hoogte van de beplanting op de windsnelheid op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



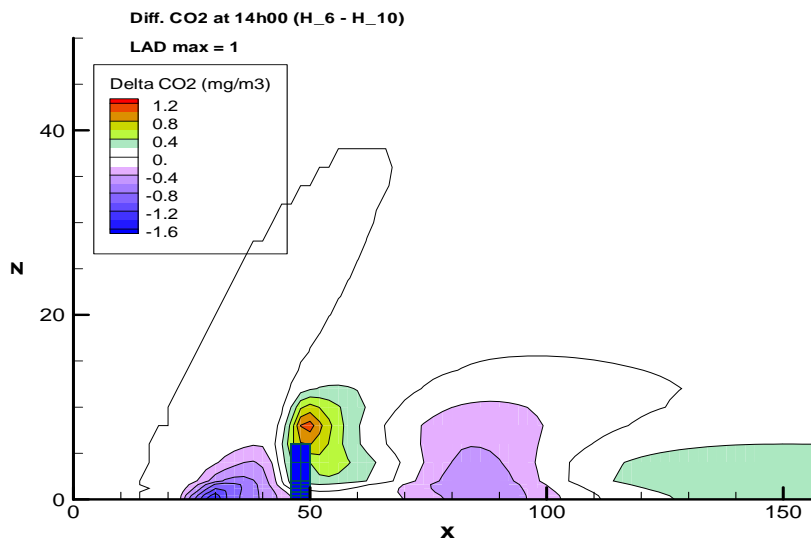
Figuur 3.10: Effect van de hoogte van de beplanting op de PM_{10} concentratie op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



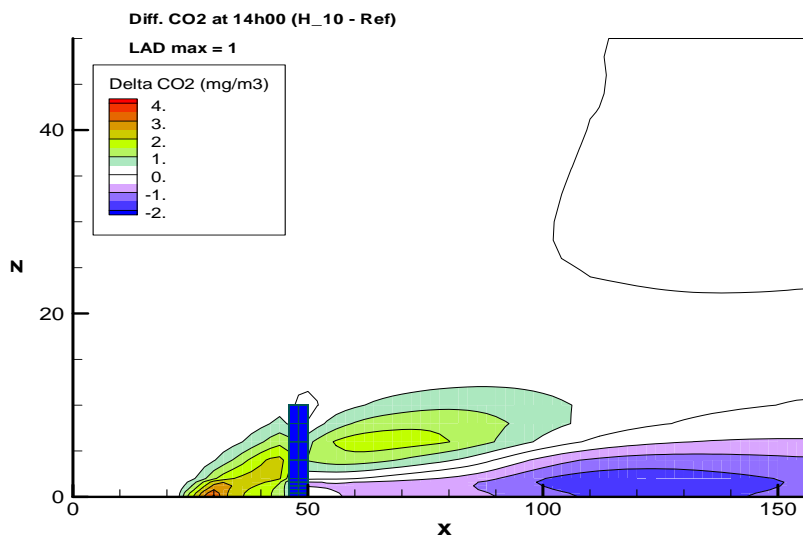
Figuur 3.11: Effect van de hoogte van de beplanting op de NO_2 concentratie op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



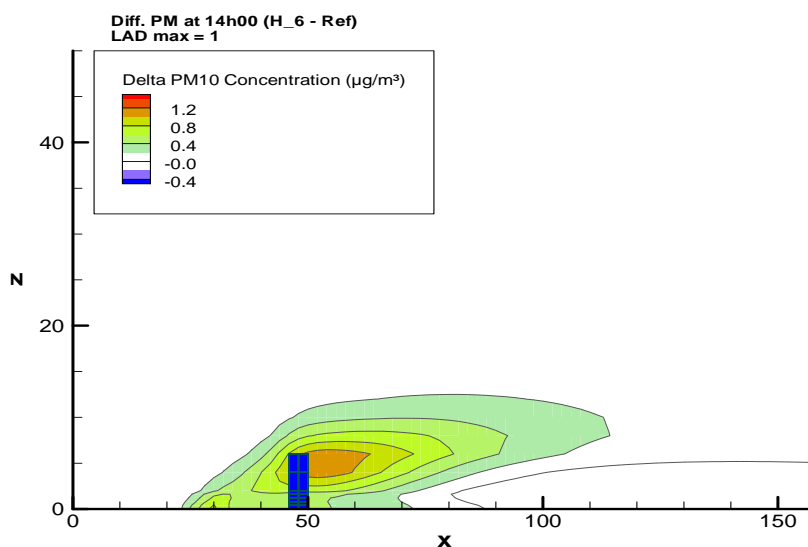
Figuur 3.12: Effect van de hoogte van de beplanting op de CO_2 concentratie op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



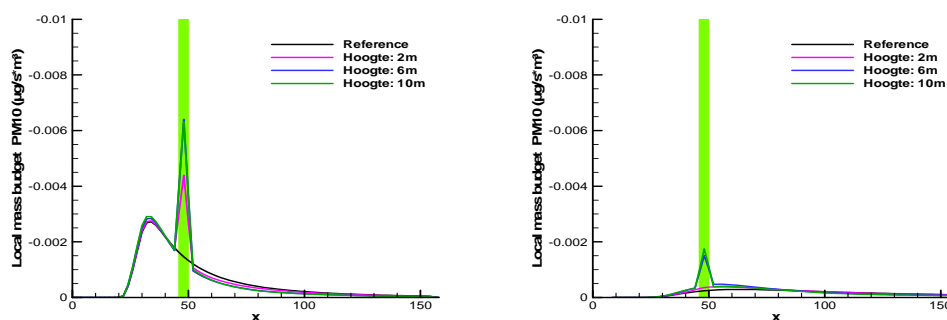
Figuur 3.13: Ruimtelijke (x-z) verdeling van het verschil in CO₂ concentratie met een beplanting met een hoogte van 6 m t.o.v. 10 m (H₆ – H₁₀).



Figuur 3.14: Ruimtelijke (x-z) verdeling van het verschil in CO₂ concentratie met en zonder beplanting met een hoogte van 10 m (H₁₀ – Ref).



Figuur 3.15: Ruimtelijke (x-z) verdeling van het verschil in PM_{10} concentratie met en zonder beplanting met een hoogte van 6 m (H₆ – Ref).



Figuur 3.16: Effect van de hoogte van de beplanting op het lokale massa budget van PM_{10} op een hoogte van 2m (linker plot) en van 6m (rechter plot).

3.5 BREEDTE VAN DE BEPLANTING

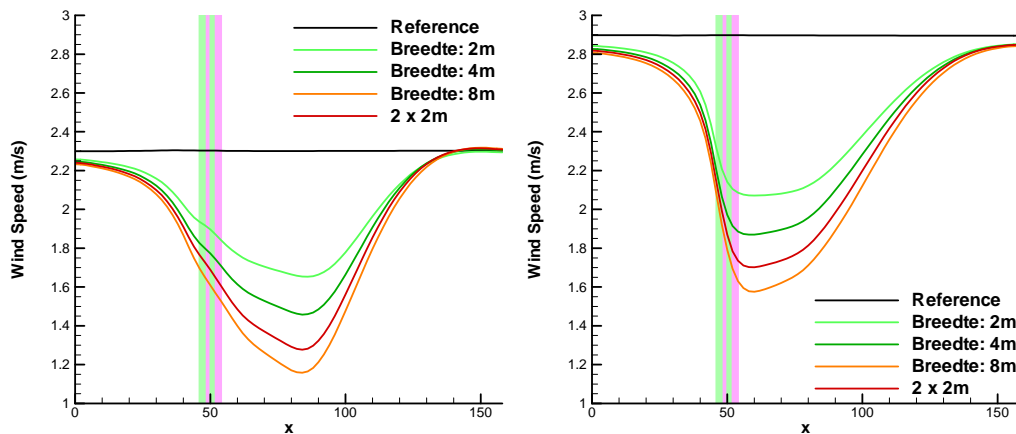
Vijf scenario's zijn opgenomen in deze analyse: Ref zonder beplanting, B₂, B₄ en B₈ met een 10 m hoge beplanting van respectievelijk 2, 4 en 8 m breedte op 16 m van de bron, en B_{2x2} met een 10 m hoge dubbele beplanting van 2 m breedte en een tussenafstand van 2 m op 16 m van de bron.

De evolutie van de windsnelheid in de 4 scenario's met beplantingen is vergelijkbaar met een waarneembaar effect dat in relatie staat met de totale breedte van de structuur. De dubbele beplanting (H_{2x2}) heeft een grotere effect op de windsnelheid dan het B₄ scenario hoewel in totaal evenveel vegetatie aanwezig is in de structuur (Figuur 3.17). De breedte van de beplanting heeft een duidelijk effect op het lokale massa budget van PM_{10} (Figuur 3.21). Hier ook is het effect van een discontinue beplanting (2 x 2m) zichtbaar. De piek verkregen door deze opstelling ligt op een vergelijkbaar

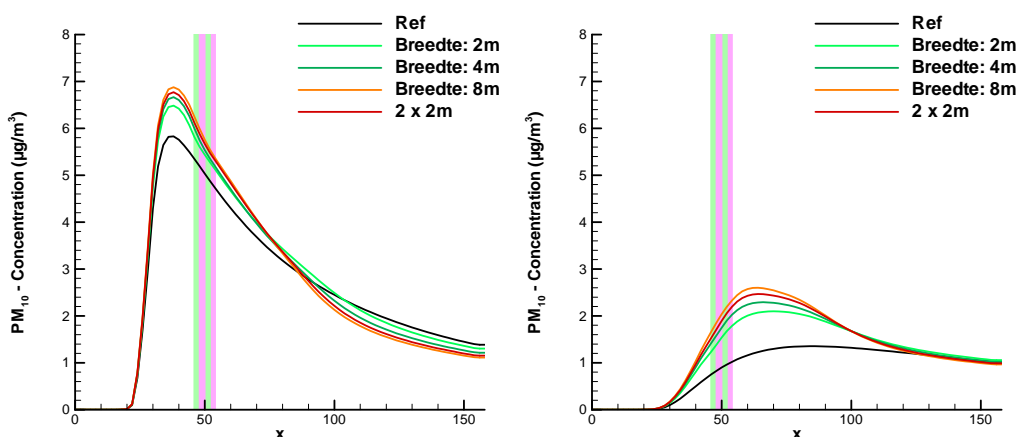
niveau als deze van een enkele beplanting met een breedte van 2 m maar het effect blijft op de hele breedte van de opstelling.

De concentraties evolueren ook op een vergelijkbare manier en dezelfde patronen wordt terug gevonden als in de vorige paragrafen. Vóór en vlak achter de structuur wordt een verhoging vastgesteld. Op grond niveau (2 m) vindt men vanaf een afstand van ± 4 keer de hoogte van de vegetatie verlaagde concentraties (Figuur 3.18, Figuur 3.19 en Figuur 3.20).

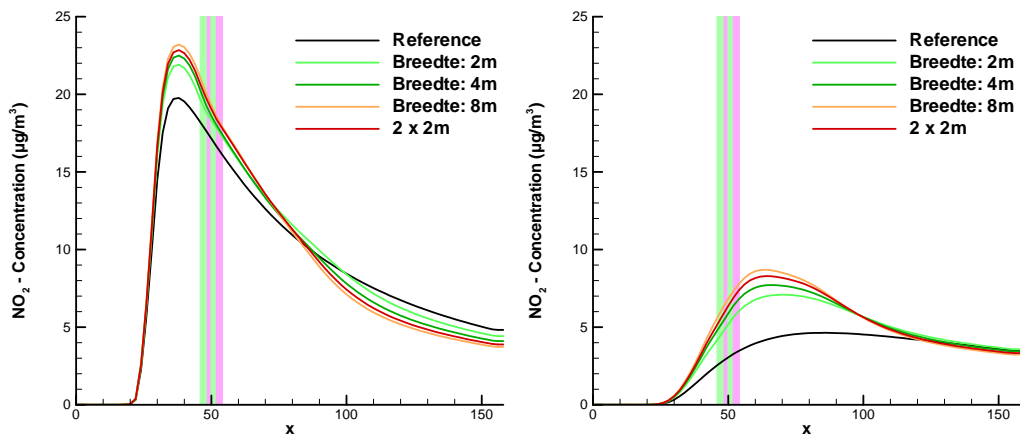
Figuur 3.22 geeft de ruimtelijke verdeling van het verschil in PM₁₀ concentratie tussen het scenario B_2x2 en B_4. De dubbele beplanting heeft een groter vertragend effect op de windsnelheid. Dit veroorzaakt een verhoging van de concentratie voor en na de beplanting maar ook een duidelijke vermindering aan de grond vanaf een afstand gelijk aan ± 4 maal de hoogte van de beplanting.



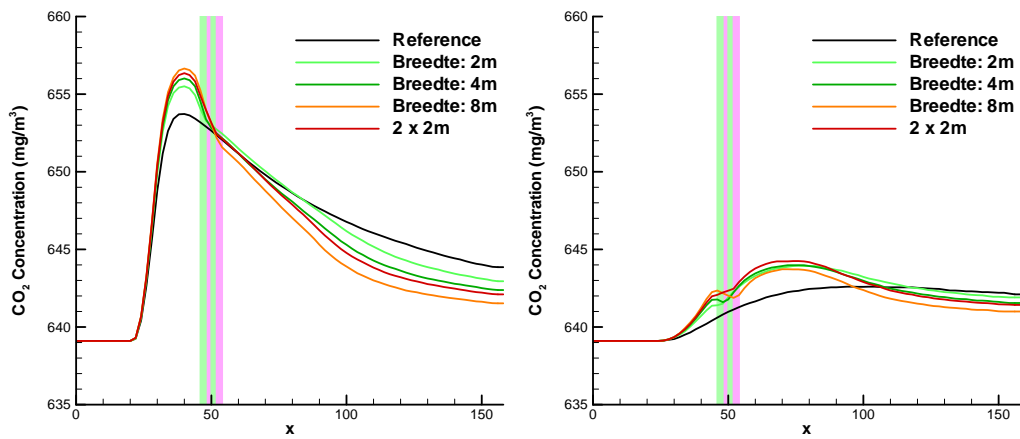
Figuur 3.17: Effect van de breedte van de beplanting op de windsnelheid op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



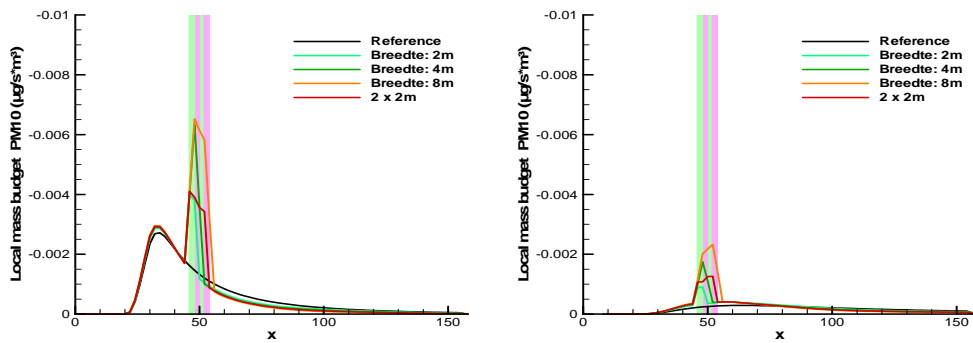
Figuur 3.18: Effect van de breedte van de beplanting op de PM₁₀ concentratie op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



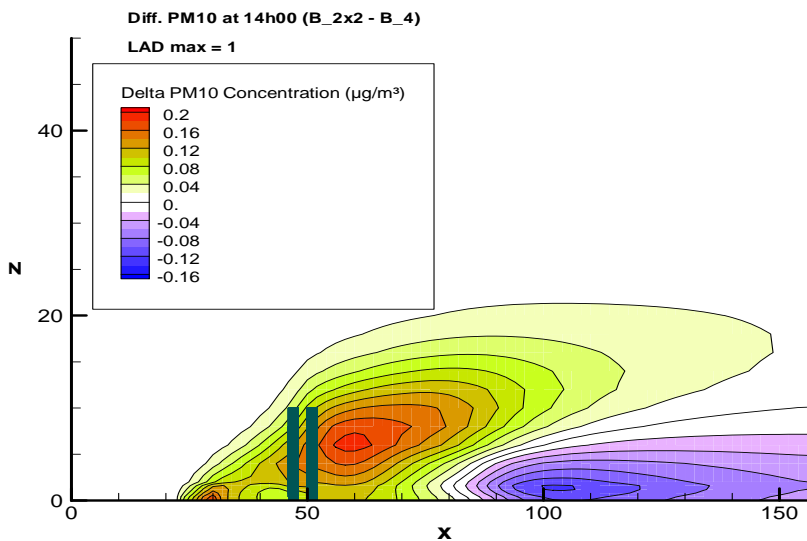
Figuur 3.19: Effect van de breedte van de beplanting op de NO₂ concentratie op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



Figuur 3.20: Effect van de breedte van de beplanting op de CO₂ concentratie op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



Figuur 3.21: Effect van de breedte van de beplanting op het lokale massa budget van PM₁₀ op een hoogte van 2m (linker plot) en van 6m (rechter plot).



Figuur 3.22: Ruimtelijke (x-z) verdeling van het verschil in PM₁₀ concentratie met beplanting met een breedte van 2x2 m met een tussenafstand van 2 m en 4 m (B_2x2 – B_4).

3.6 DENSITEIT (LEAF AREA DENSITY)

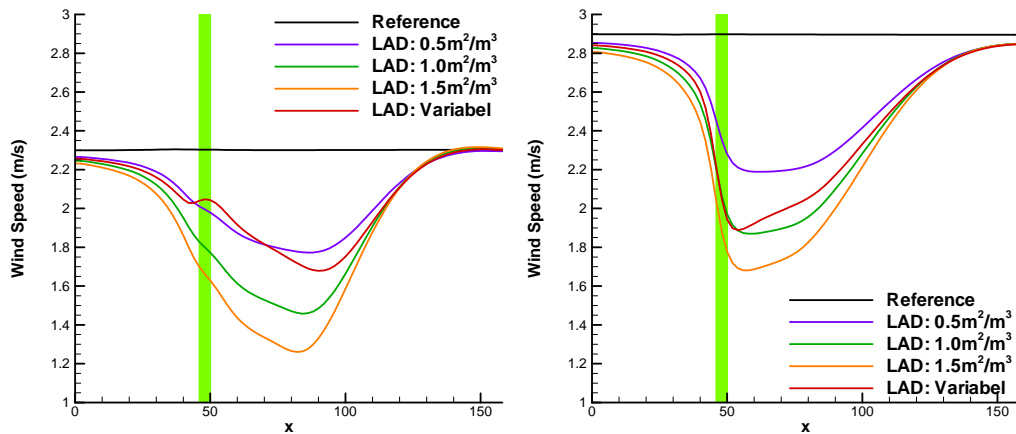
Vijf scenario's zijn opgenomen in deze analyse: Ref zonder beplanting, L_0.5, L_1.0 en L_1.5 met een 10 m hoge en 4 m brede beplanting met een respectievelijke densiteit (Leaf Area Density) van 0.5, 1.0 en 1.5 m²/m³ op 16 m van de bron, en L_var met een vergelijkbare beplanting maar met een variabele densiteit i.f.v. de genormaliseerde hoogte [0.1, 0.25, 0.5, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0.5].

Het effect van de beplanting op de windsnelheid is vergelijkbaar in de scenario's L_0.5, L_1.0 en L_1.5 en verhoogt met de densiteit van de beplanting (Figuur 3.23).

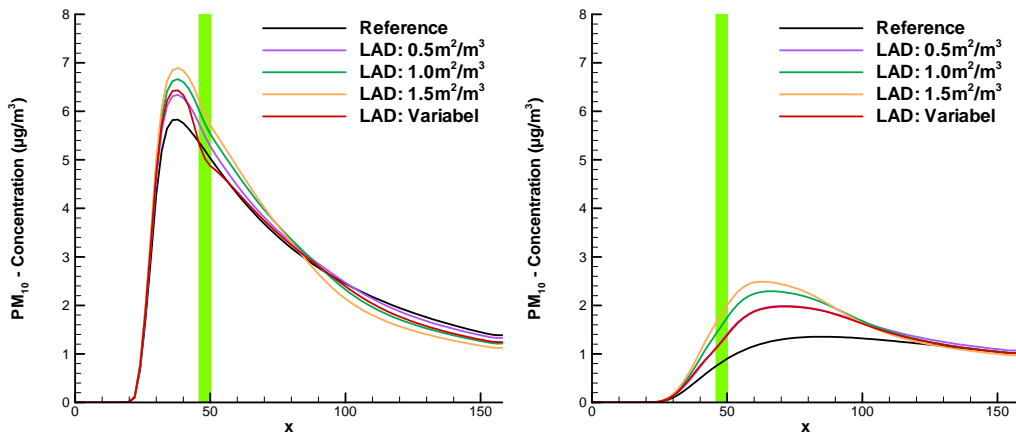
Hetzelfde kan gezegd worden van de evolutie van de PM₁₀, NO₂ en CO₂ concentraties (Figuur 3.24, Figuur 3.25 en Figuur 3.26). Een beplanting met een homogene densiteit (LAD van 1.0 m²/m³) veroorzaakt een verhoging van de PM concentraties voor en na de vegetatielijn (Figuur 3.27). Het is pas na een zekere afstand (vanaf ongeveer 5 maal de hoogte van de beplanting) dat een vermindering in de concentraties te noteren is.

De curve van het scenario met beplanting van variabele densiteit (L_var) ziet er iets anders uit omwille van het feit dat er meer wind door de onderste lagen van de beplanting kan stromen (Figuur 3.23). Dit LAD profiel veroorzaakt lagere concentraties voor de beplanting maar ook een geringere afname erachter (Figuur 3.28). Dit is eveneens goed zichtbaar in Figuur 3.29 die de ruimtelijke verdeling geeft van het verschil in CO₂ concentratie tussen de beplanting met variabele densiteit (L_var) t.o.v. de beplanting met een LAD van 1.0 m²/m³. Afhankelijk van waar het reducerend effect juist beoogd wordt, kan deze parameter van het vegetatie element dus gebruikt worden om de structuur te optimaliseren.

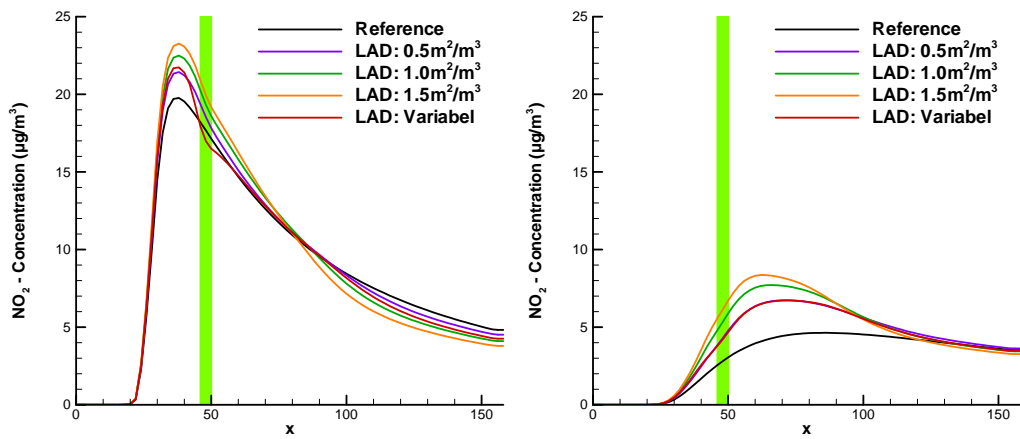
Het effect op het lokale massa budget van PM₁₀ is proportioneel aan de bladdensiteit (Figuur 3.30). Bij variabele bladdensiteit is het effect natuurlijk variabel met de hoogte i.f.v. de bladdensiteit op die hoogte maar vergelijkbaar aan dat van de beplanting met een vergelijkbare bladdensiteit.



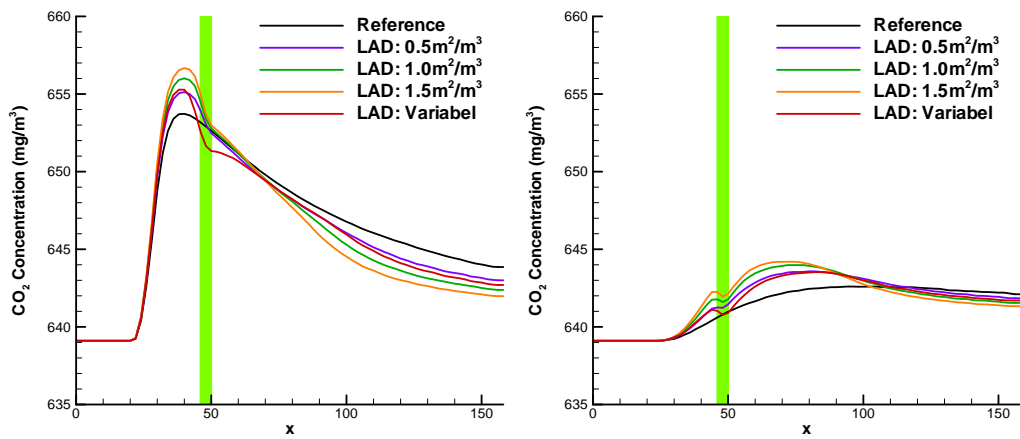
Figuur 3.23: Effect van de densiteit van de beplanting (LAD) op de windsnelheid op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



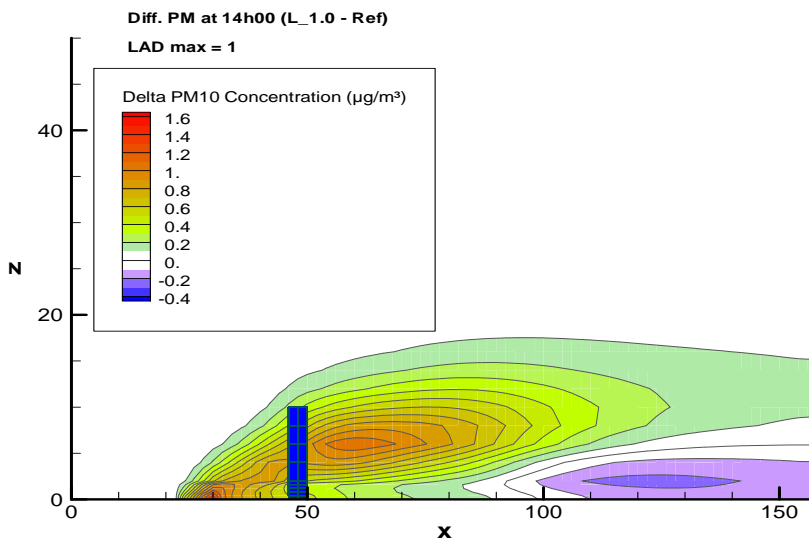
Figuur 3.24: Effect van de densiteit van de beplanting (LAD) op de PM₁₀ concentratie op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



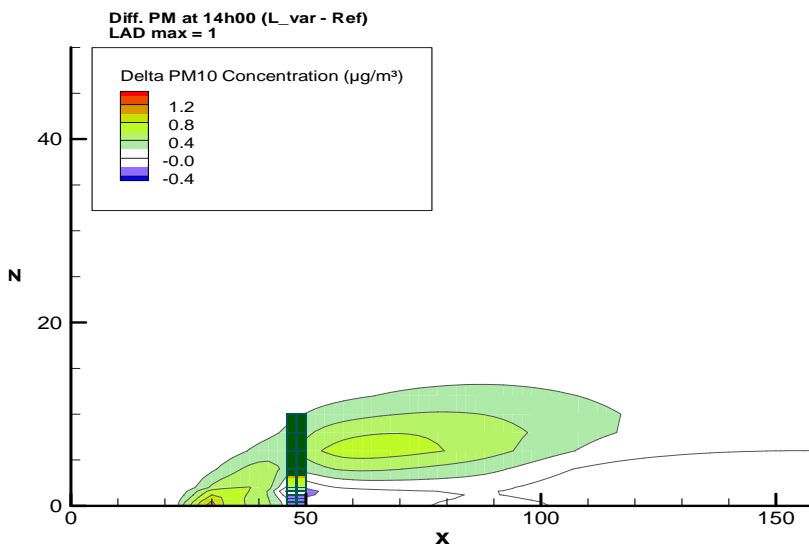
Figuur 3.25: Effect van de densiteit van de beplanting (LAD) op de NO₂ concentratie op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



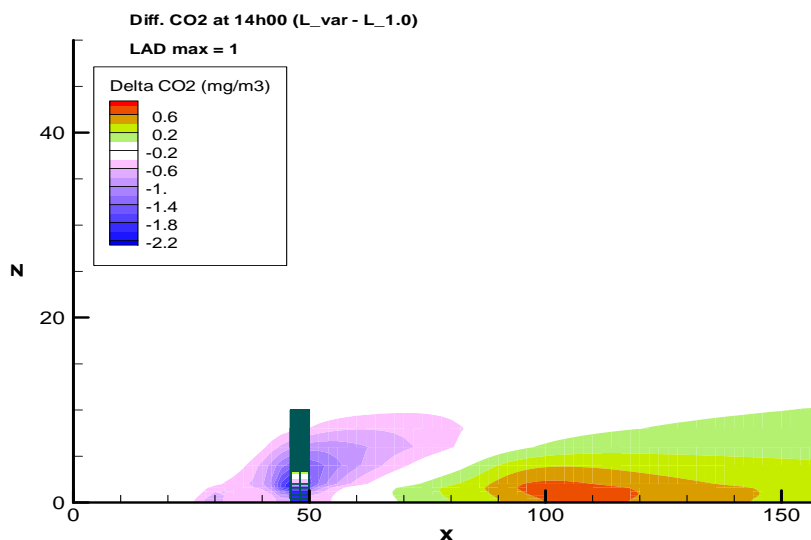
Figuur 3.26: Effect van de densiteit van de beplanting (LAD) op de CO₂ concentratie op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



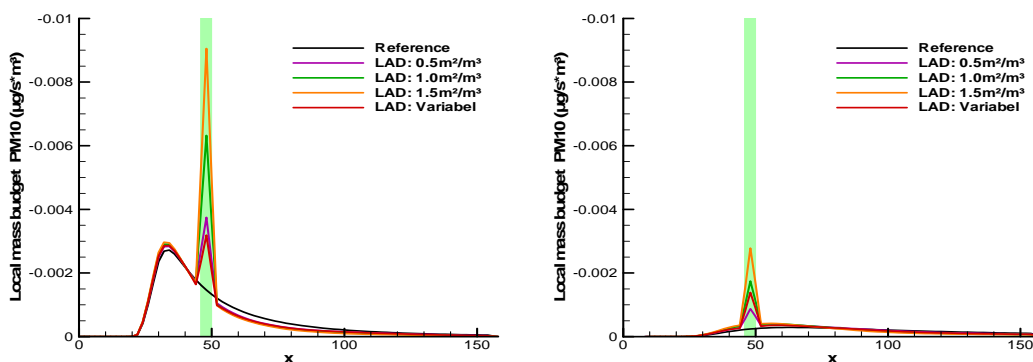
Figuur 3.27: Ruimtelijke (x-z) verdeling van het verschil in PM_{10} concentratie met en zonder beplanting met een homogene LAD van 1.0 (L_1.0 – Ref).



Figuur 3.28: Ruimtelijke (x-z) verdeling van het verschil in PM_{10} concentratie met en zonder beplanting met een variabele LAD (L_var – Ref).



Figuur 3.29: Ruimtelijke (x-z) verdeling van het verschil in CO₂ concentratie met beplanting met een variabele LAD t.o.v. een beplanting met een homogene LAD van 1.0 (L_{var} – L_{1.0}).



Figuur 3.30: Effect van de densiteit van de beplanting (LAD) op het lokale massa budget van PM₁₀ op een hoogte van 2m (linker plot) en van 6m (rechter plot).

3.7 TYPE BOOM: LOOFBOMEN VERSUS NAALDBOMEN

In deze analyse zijn vier scenario's opgenomen: Ref zonder beplanting, T_L, T_{Na} en T_T met een 10 m hoge en 4 m brede beplanting met een zelfde densiteit (LAD = 1.0 m²/m³) op 16 m van de bron. T_L en T_{Na} maken gebruik van de defaultwaarden van ENVI-met voor respectievelijk de loof- en naaldbomen. T_T is een scenario met een aangepaste definitie voor de naaldhoutbeplanting.

Het T_T scenario is doorgerekend als test om de gevoeligheid van de resultaten voor de parameters A en D te kunnen inschatten (zie ook Figuur 2.1). In ENVI-met wordt het type vegetatie immers voornamelijk bepaald door deze

grootheden. Deze 2 parameters worden gebruikt voor de berekening van de aerodynamische weerstand op bladniveau die een effect heeft op de depositie van deeltjes en gassen. Zoals beschreven in §2.3.2 kunnen deze beide grootheden worden samengenomen in de variabele $C_a = A\sqrt{D}$. In ENVI-met hebben de loof- en naaldbomen respectievelijk een standaard C_a waarde van 77 en 12 (Schilling, 1990; Naot and Mahrer, 1989). Aangezien de C_a waarde van naaldbomen zich op het begin van het exponentiele gedeelte van de curve bevindt (Figuur 2.1), kunnen kleine veranderingen in de waarde van deze parameter van grote invloed zijn op de depositiesnelheden. Het bijkomend scenario T_T met een fictieve naaldhout vegetatie met een C_a waarde van 4 werd aangemaakt om het effect van deze parameter te kunnen inschatten. Deze waarde correspondeert met een typische bladdiameter van 2mm.

Zoals gezegd, worden in de T-scenario's, die de invloed van het type vegetatie willen analyseren, de andere parameters van de beplanting zoals densiteit, hoogte en breedte niet aangepast. Dit is niet echt realistisch omdat een naaldboom wel degelijk structureel verschilt van een loofboom. Zo is de Leaf Area Index (hoeveelheid éénzijdig bladoppervlak geprojecteerd per eenheid grondoppervlak) van naaldbomen in het algemeen groter dan die van loofbomen (Breuer et al., 2003). Omdat in deze analyse echter enkel de parameterisatie van het type vegetatie bestudeerd wordt, is toch voor deze optie gekozen. Bijgevolg is het logisch dat de 3 types dezelfde invloed hebben op het verloop van de windsnelheid (Figuur 3.31).

De resultaten voor PM₁₀ (Figuur 3.32) geven aan dat vooral een verlaging van de aerodynamische bladweerstand van de beplanting leidt tot een drastische verlaging van de concentraties achter deze beplanting (T_T berekening). Dit zou ook kunnen verklaren waarom in de literatuur wordt gevonden dat naaldbomen beter fijn stof uit de lucht verwijderen dan loofbomen (zie bijv. Freer-Smith et al., 2005). Immers, naaldbomen hebben een lagere aerodynamische bladweerstand dan loofbomen. Betere informatie over de aerodynamische weerstand op niveau van het blad van boomsoort is een belangrijk aandachtspunt voor de toekomst.

Het type beplanting lijkt van weinig invloed te zijn op de daling van de NO₂ en CO₂ concentratie (Figuur 3.33 en Figuur 3.34). De drie curven met beplantingen liggen bijna over elkaar en zijn op deze schaal niet te onderscheiden.

De oorzaak hiervoor ligt in het feit dat de stomatale weerstand het dominante proces is tijdens de depositie. De variatie in de aerodynamische bladweerstand tussen loof- en naaldhout is hierbij zo goed als te verwaarlozen. In de berekeningen die tot hiertoe zijn uitgevoerd, is voor de stomatale weerstand steeds het A-g_s model van Jacobs (2004) gebruikt. Dit model maakt echter geen onderscheid tussen naald en loofhout maar houdt enkel rekening met het type van CO₂ assimilatie (C3 of C4). Naald en loofbomen zijn beide C3 types. In de eenvoudigere parameterisatie van Deardorff (Vlg. 13) kan wel een onderscheid gemaakt worden tussen loof en naaldhout via de $r_{s,min}$ parameter. Voor loofbomen wordt deze parameter op 400 s/m ingeschat. Voor naaldbomen wordt

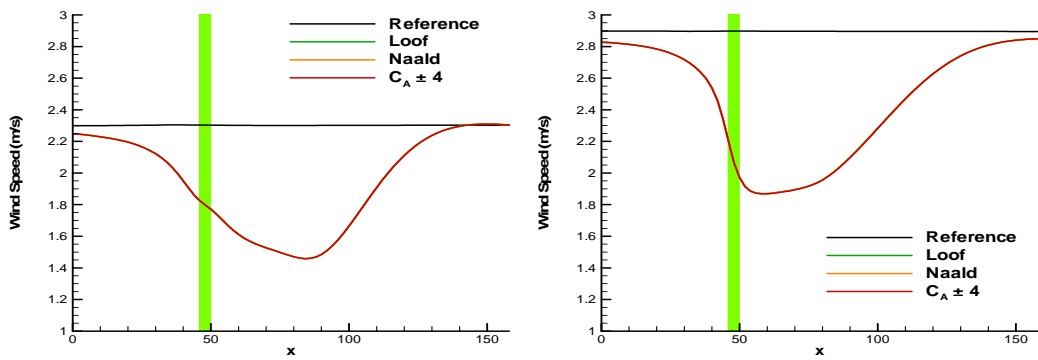
een lichtjes hogere waarde verwacht (Breuer, 2002). Om de gevoeligheid in te schatten van de stomatale weerstand op de concentratieprofielen, zijn een aantal berekeningen uitgevoerd met het eenvoudige Deardorff model met $r_{s,min}$ waarden tussen 375 en 600 s/m. De resultaten zijn samengevat in Figuur 3.35. Op basis van deze modelberekeningen moet worden vastgesteld dat de exacte beschrijving van de stomatale weerstand weinig invloed heeft op de concentratieprofielen. De twee modellen onderling geven lichtjes afwijkende resultaten maar het verschil in stomatale weerstand tussen loof en naaldhout is niet significant in het concentratieverloop.

Deze vaststelling is consistent met bevindingen in de literatuur dat de geleidbaarheid van bladeren voor NO₂ niet duidelijk varieert tussen loofbomen en naaldbomen (zie bijv. Hanson en Lindberg, 1991). Ook gerapporteerde depositiesnelheden voor loof- en naaldbomen zijn vergelijkbaar (zie bijv. Murphy en Sigmon, 1990). Aandacht moet ook besteed worden, zoals hierboven vermeld, aan het feit dat in deze gevoeligheidsanalyse enkel het type beplanting aangepast wordt (loof versus naald) zonder enige andere parameter, zoals hoogte, breedte, variatie in LAD ..., te veranderen. De meeste studies hebben het effect van boomsoorten op de opname van gassen bestudeerd als boom, vaak zelfs als bos, zonder rekening te houden met al deze parameters.

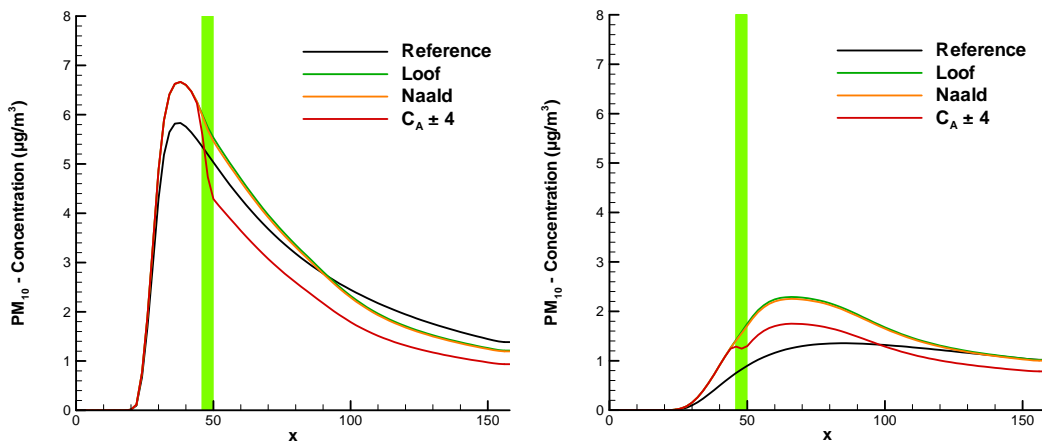
In Figuur 3.36 en Figuur 3.37 wordt het lokale massa budget van respectievelijk NO₂ en PM₁₀ getoond op 2 en 6 m hoogte (omgekeerde y-as om de depositie of winst aan te tonen). Op deze schaal is er voor het referentiescenario zonder beplanting geen zichtbaar effect. Voor NO₂ is er heel weinig verschil tussen de 3 types van beplanting, zelfs voor de fictieve beplanting met een C_a van 4. Voor PM₁₀ zijn de verschillen tussen de 3 types van beplanting veel groter, zeker voor de fictieve beplanting met een C_a van 4. Figuur 3.38 geeft een vergelijking op dezelfde schaal van het lokale massa budget voor NO₂ en PM₁₀ zonder de resultaten voor de alternatieve parameterisatie ($C_a = 4$) voor naaldhout. Hier is het verschil voor PM₁₀ tussen loof- en naaldbomen duidelijk te zien.

In Figuur 3.39 wordt de ruimtelijke verdeling getoond van het verschil in PM₁₀ concentratie voor naaldbomen versus loofbomen. Hoewel de verschillen zeer klein zijn, blijken de naaldbomen lagere PM₁₀ concentraties te veroorzaken in vergelijking met loofbomen.

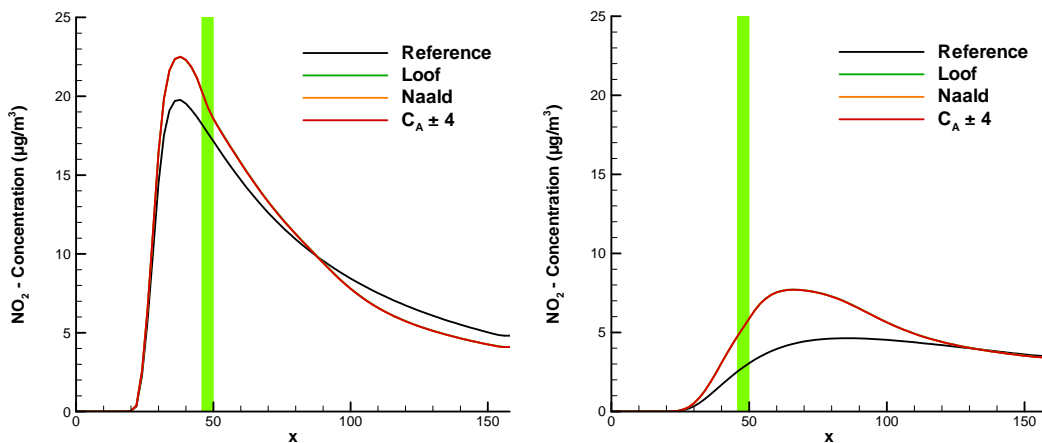
In Figuur 3.40 wordt het fictieve boomtype met een zeer lage aerodynamische weerstand (T_T met een $C_a = 4$) vergeleken met de naaldboom. De resultaten zijn vergelijkbaar met die van Figuur 3.39 maar met veel hogere absolute waarden. De vergelijking in Figuur 3.39 tussen naald- en loofbomen is immers ook gebaseerd op een verschil in C_a (12 voor naaldbomen en 77 voor loofbomen als standaard in ENVI-met) en het is dus logisch dat het verloop vergelijkbaar is. Het verband tussen de C_a waarde en de PM₁₀ depositiesnelheid is weergegeven in Figuur 2.1.



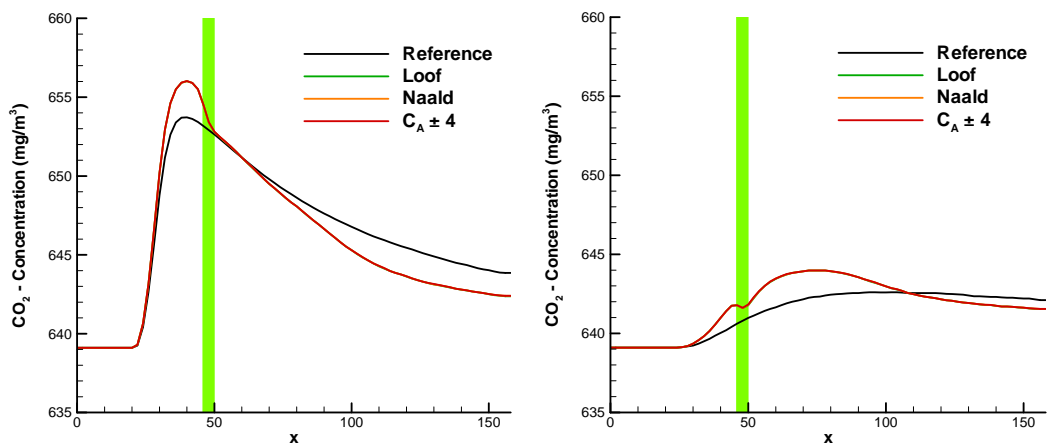
Figuur 3.31: Effect van het type van beplanting (loof/naald/test) op de windsnelheid op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



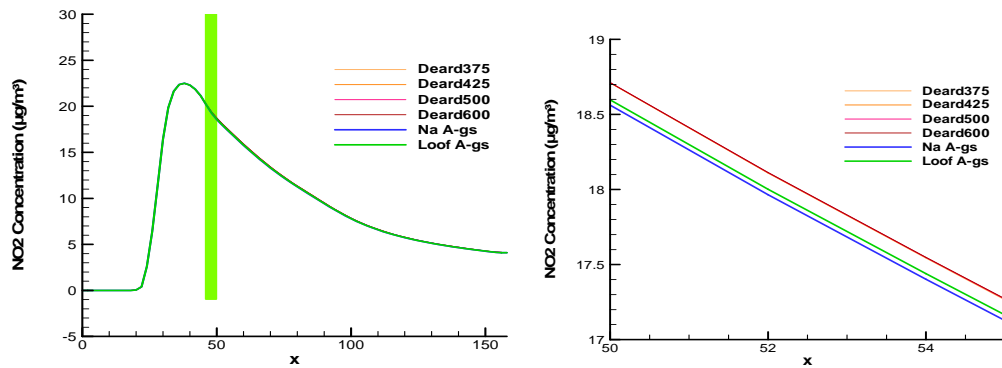
Figuur 3.32: Effect van het type van beplanting (loof/naald/test) op de PM₁₀ concentratie op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot).



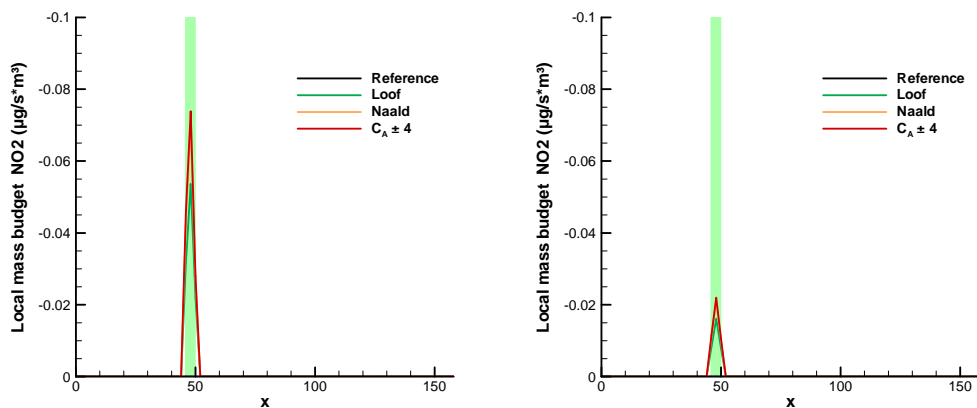
Figuur 3.33: Effect van het type van de beplanting (loof/naald) op de NO₂ concentratie op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot). De 3 curven met beplanting liggen praktisch over elkaar.



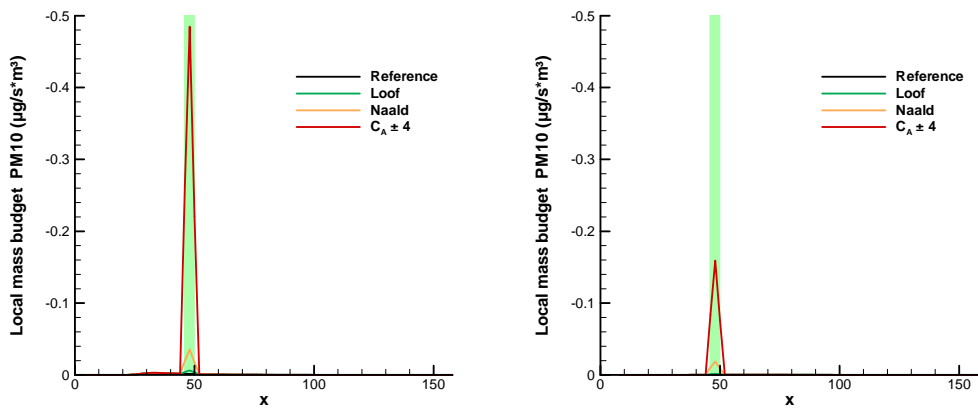
Figuur 3.34: Effect van het type van beplanting (loof/naald) op de CO₂ concentratie op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot). De 3 curven met beplanting liggen praktisch over elkaar.



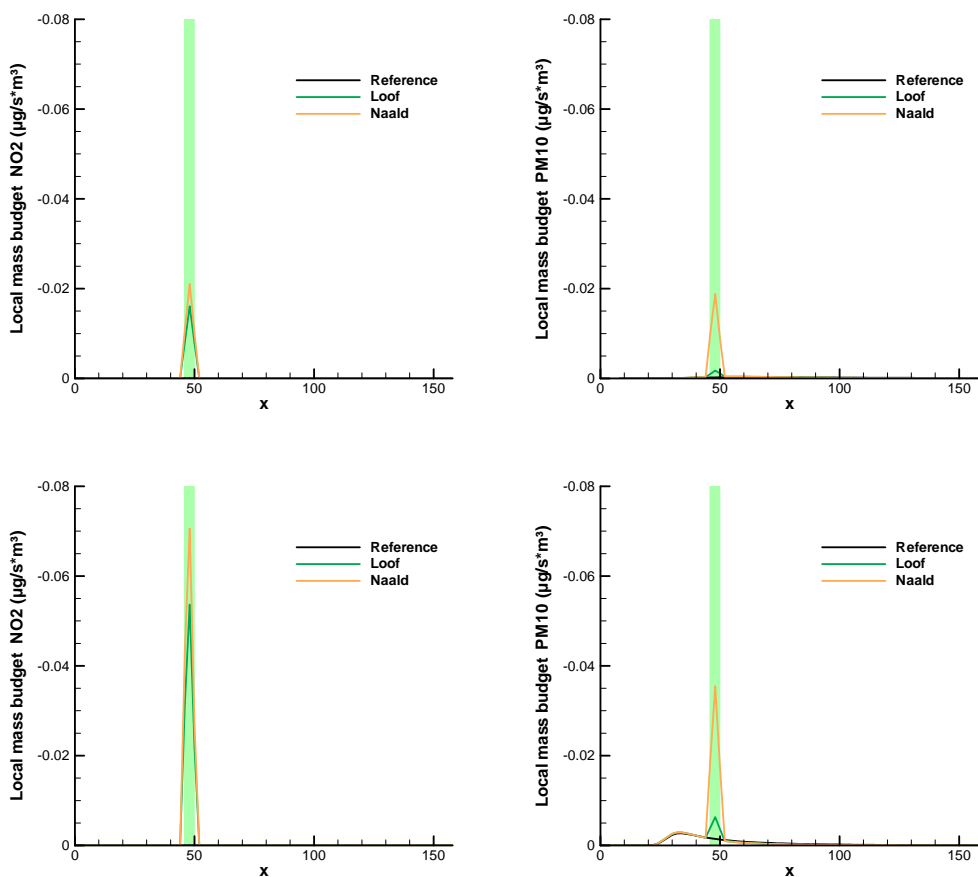
Figuur 3.35: Effect van het type model voor de stomatale weerstand op 2 m hoogte. Voor het A-g_s model is de standaard loof en naald parameterisatie aangenomen. Voor het Deardorff model zijn 4 verschillende $r_{s,min}$ waarden doorgerekend (375, 425, 500, 600). De rechter figuur geeft een inzoom op het profiel van de linkse plot.



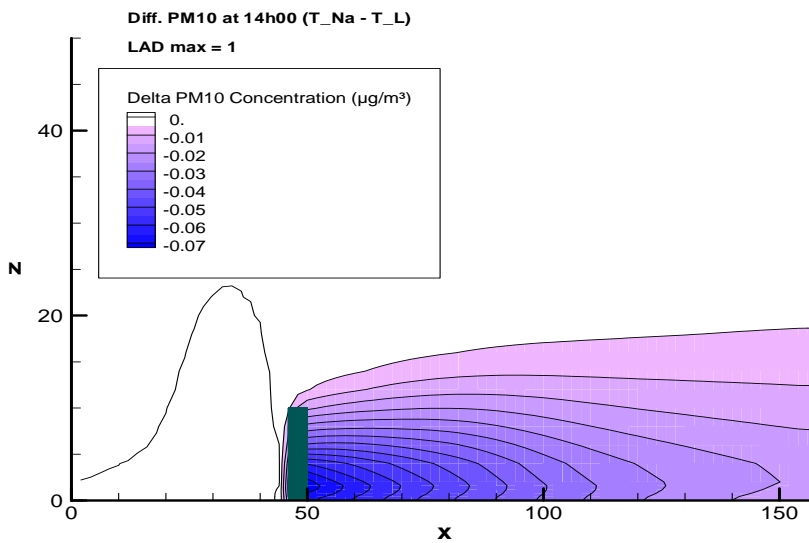
Figuur 3.36: Effect van het type van beplanting (loof/naald) op het lokale massa budget van NO₂ op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot). Zonder beplanting (Ref) is het effect op het lokale massa budget op deze schaal niet zichtbaar.



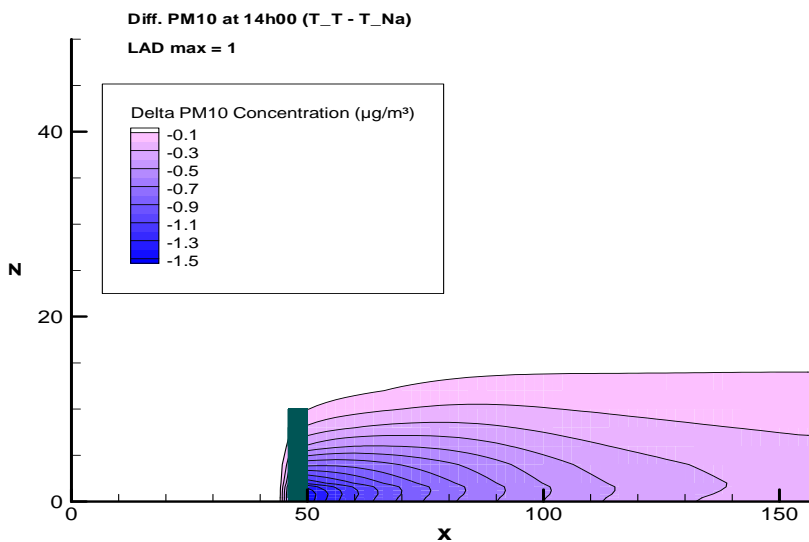
Figuur 3.37: Effect van het type van beplanting (loof/naald) op het lokale massa budget van PM_{10} op een hoogte van 2m (linker plot) en op een hoogte van 6m (rechter plot), zonder beplanting (Ref) is het effect op het lokale massa budget op deze schaal niet zichtbaar.



Figuur 3.38: Effect van het type van beplanting (loof/naald) op het lokale massa budget van NO_2 (linker plots) en PM_{10} (rechter plots) op een hoogte van 6m (boven) en 2m (onder) zonder de berekening met $C_a = 4$ en op dezelfde schaal.



Figuur 3.39: Ruimtelijke (x-z) verdeling van het verschil in PM₁₀ concentratie met beplanting met naaldbomen versus loofbomen (T_{Na} – T_L).



Figuur 3.40: Ruimtelijke (x-z) verdeling van het verschil in PM₁₀ concentratie met beplanting met bomen met een $C_a = 4$ (test type) versus een $C_a = 12$ zoals standaard is voor naaldbomen in ENVI-met.

3.8 DEPOSITIE EN DEPOSITIEWEERSTANDEN

Zoals in §2.3 beschreven, is de depositie het resultaat van de atmosferische concentratie en een combinatie van verschillende weerstanden. In §3.7 werd duidelijk dat de aerodynamische bladweerstand een zeer belangrijke invloed kan hebben op de totale depositiesnelheid. Voor gassen speelt naast deze aerodynamische weerstand (en de quasi laminaire grenslaag weerstand) ook de

stomatale weerstand een rol. Deze stomatale weerstand wordt in ENVI-met berekend op basis van het beschikbare bodemvocht, de CO₂ concentratie en de straling. Vooral door toedoen van deze laatste component, kent de stomatale weerstand een sterke dagcyclus.

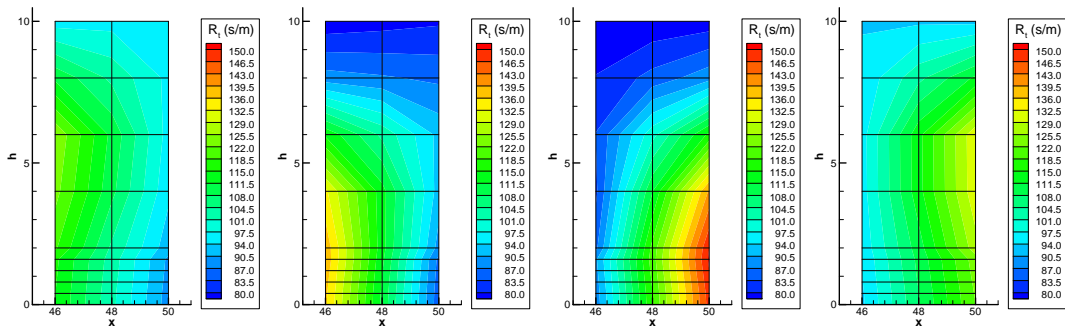
Figuur 3.41, Figuur 3.42 en Figuur 3.43 tonen een dwarsdoorsnede (x-z) van het scenario met de standaardvegetatie op verschillende ogenblikken gedurende de dag. Figuur 3.41 geeft de stomatale weerstand in s/m in het element op verschillende ogenblikken van de dag. Figuur 3.42 is een analoge figuur voor de NO₂ depositiesnelheid (in mm/s). Beide variëren zowel in tijd als in ruimte en zijn sterk afhankelijk van de bladtemperatuur die varieert i.f.v. de stand van de zon. Gedurende de nacht zal de stomatale weerstand ongeveer gelijk zijn in het ganze element en stijgen tot ongeveer 290 s/m. De depositiesnelheid zal dalen tot zo'n 1.8 mm/s. Figuur 3.43 tenslotte geeft de NO₂ depositie per bladoppervlak weer. Figuur 3.44 is vergelijkbaar met Figuur 3.43 maar geeft de NO₂ depositie om 14 uur per bladoppervlak weer voor naaldbomen i.p.v. loofbomen.

Om de totale opname van een gas of stof door de vegetatie te berekenen, dient men depositie per bladoppervlak te vermenigvuldigen met de Leaf Area Density en vervolgens te integreren over het volume van de vegetatie. De resultaten hiervan, voor de situatie om 14.00 h, zijn opgenomen in Tabel 3.7 en Tabel 3.8 voor NO₂ en PM₁₀ respectievelijk. De depositie is berekend voor elk type vegetatie en uitgedrukt in µg/s per meter lijn element in de lengte richting. Het is nu mogelijk de opvang van NO₂ of fijn stof per meter vegetatie te vergelijken met de uitstoot per meter weglengte. De procentuele opname door het vegetatie element van de totale uitstoot is weergegeven in de laatste kolom. In de tabellen zijn ook de depositiesnelheden (minimale, maximale en gemiddelde) in het vegetatie element opgenomen.

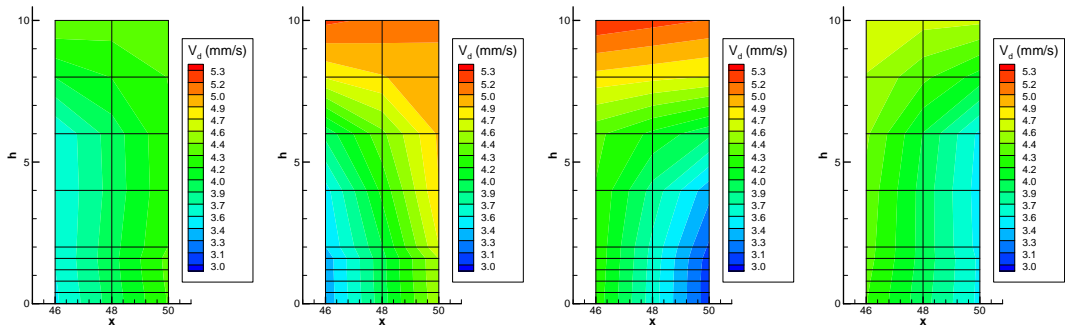
Voor NO₂ worden gemiddelde depositiesnelheden berekend van circa 4 tot 6 mm/s. Deze snelheden zijn consistent met gegevens uit de literatuur. Zo maken Murphy en Sigmon (1990) melding van depositiesnelheden die variëren van 1 tot 6 mm/s voor zowel loof- als naaldbomen. De relatieve afvang van NO₂ ten opzichte van de bron lijkt gering te zijn en bedraagt circa 1 %. Variatie van de aerodynamische weerstand is nauwelijks van invloed op deze relatieve afvang. Voorlopig lijkt de conclusie gerechtvaardigd dat het effect van het vegetatie element op de concentratie van NO₂ vooral verloopt door verstoring van het windveld.

Met betrekking tot PM₁₀ variëren de berekende depositiesnelheden gemiddeld van circa 1 mm/s voor loofbomen tot 15 mm/s voor naaldbomen. Vergelijking met gerapporteerde waarden in de literatuur wordt bemoeilijkt door verschillen in belangrijke factoren als niveau van de concentratie, wijze waarop de bomen worden aangestroomd met vervuilde lucht (zijwaarts zoals bij een vegetatie element tegenover bovenlangs bij bomen in een bos), boomsoort en deeltjesgrootte. De depositiesnelheden die met het ENVI-met model voor loofbomen zijn berekend, zijn duidelijk lager dan die welke experimenteel door Freer-Smith et al. (2005) voor verschillende loofbomen werden vastgesteld (4-54

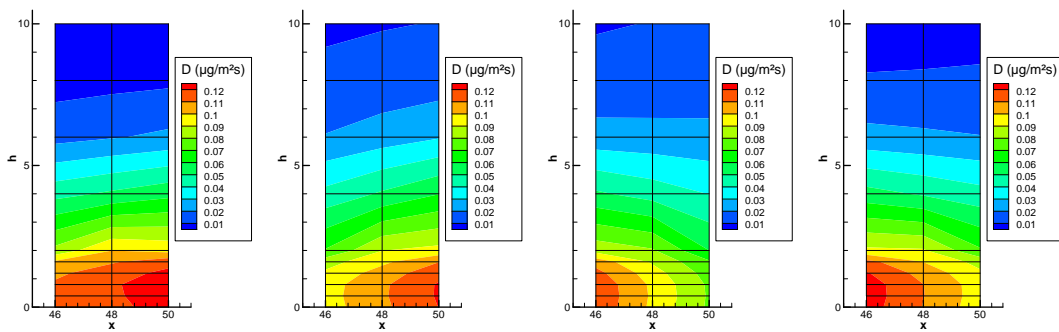
mm/s). Voor naaldbomen lijken de verschillen minder groot. Freer-Smith et al. (2005) stelden depositiesnelheden vast van 28–47 mm/s voor Corsicaanse den en 34-62 mm/s voor Cypres terwijl het ENVI-met model een gemiddelde depositiesnelheid van 15 mm/s voor naaldbomen berekent. Opvallend is het duidelijke effect van de aerodynamische bladweerstand op de depositiesnelheid. Hoe geringer deze weerstand, des te groter is de depositiesnelheid van PM₁₀. Meer kwantitatieve kennis moet worden gegenereerd over de relatie tussen de depositiesnelheid van PM₁₀ op een vegetatie element en de aerodynamische bladweerstand in de praktijk. Dit is te meer van belang daar naast de versterking van het windveld, het filterend vermogen van een vegetatie element een belangrijke additionele factor kan zijn voor de daling van de PM₁₀ concentratie achter het element.



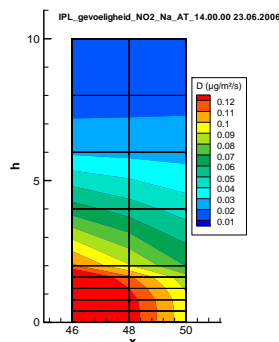
Figuur 3.41: Dwarsdoorsnede vegetatie-element – stomatale weerstand (s/m) om 08.00 – 11.00 – 14.00 – 17.00 uur



Figuur 3.42: Dwarsdoorsnede vegetatie-element – NO₂ depositiesnelheden (mm/s) om 08.00 – 11.00 – 14.00 – 17.00 uur.



Figuur 3.43: Dwarsdoorsnede vegetatie-element (loofbomen) – NO₂ depositie per bladoppervlak (µg/m²s) om 08.00 – 11.00 – 14.00 – 17.00 uur.



Figuur 3.44: Dwarsdoorsnede vegetatie-element (naaldboom) – NO₂ depositie per bladoppervlak (µg/m²s) om 14.00 uur. De patronen voor de andere uren zijn analoog aan deze van loofbomen.

Tabel 3.7: Depositiesnelheden (minimale, maximale en gemiddelde in het vegetatie lijnelement) in mm/s. Depositie per meter lijnvegetatie in de lengte richting (µg/s/m) en relatieve afvang van de bron voor NO₂.

NO ₂		Vd_min (mm/s)	Vd_max (mm/s)	Vd_mean (mm/s)	Depositie (µg/s/m)	Afvang (%)
Afstand tot de weg	8 m (A_8)	2,94	5,16	4,04	1,74	0,69
	16 m (A_16)	2,94	5,12	4,02	1,58	0,63
Breedte van de vegetatie	2 m (B_2)	4,14	5,04	4,33	0,85	0,34
	4 m (B_4)	2,94	5,12	4,02	1,58	0,63
	2x2 m (B_2x2)	3,73	5,10	4,27	1,82	0,72
	8 m (B_8)	2,89	5,13	3,83	3,14	1,25
Hoogte van de vegetatie	2 m (H_2)	4,30	4,97	4,66	0,94	0,37
	6 m (H_6)	3,17	5,02	4,26	1,63	0,65
	10 m (H_10)	2,94	5,12	4,02	1,58	0,63
LAD =	0.5 (L_0.5)	3,58	5,24	4,67	0,87	0,35
	1.0 (L_1.0)	2,94	5,12	4,02	1,58	0,63
	1.5 (L_1.5)	2,85	4,92	3,59	2,24	0,89
	Variabel (L_var)	3,10	5,11	4,16	0,73	0,29
Type boom	Loof (T_L)	2,94	5,12	4,02	1,58	0,63
	Naald (T_Na)	3,64	7,20	5,39	2,09	0,83
	Test (T_T)	3,77	7,66	5,67	2,19	0,87

Tabel 3.8: Depositiesnelheden (minimale, maximale en gemiddelde in het vegetatie lijnelement) in mm/s, Depositie per meter lijnvegetatie in de lengte richting ($\mu\text{g/s/m}$) en relatieve afvang van de bron voor PM_{10} .

PM_{10}		Vd_min (mm/s)	Vd_max (mm/s)	Vd_mean (mm/s)	Depositie ($\mu\text{g/s/m}$)	Afvang (%)
Afstand tot de weg	8 m (A_8)	1,128	1,131	1,129	0,160	0,214
	16 m (A_16)	1,128	1,131	1,129	0,144	0,192
Breedte van de vegetatie	2 m (B_2)	1,128	1,131	1,130	0,069	0,092
	4 m (B_4)	1,128	1,131	1,129	0,144	0,192
	2x2 m (B_2x2)	1,128	1,131	1,129	0,149	0,199
	8 m (B_8)	1,127	1,131	1,129	0,307	0,410
Hoogte van de vegetatie	2 m (H_2)	1,126	1,128	1,127	0,067	0,090
	6 m (H_6)	1,127	1,130	1,128	0,135	0,180
	10 m (H_10)	1,128	1,131	1,129	0,144	0,192
LAD =	0.5 (L_0.5)	1,128	1,132	1,130	0,066	0,088
	1.0 (L_1.0)	1,128	1,131	1,129	0,144	0,192
	1.5 (L_1.5)	1,127	1,130	1,129	0,229	0,306
	Variabel (L_var)	1,129	1,131	1,130	0,063	0,085
Type boom	Loof (T_L)	1,128	1,131	1,129	0,144	0,192
	Naald (T_Na)	3,985	31,810	15,130	1,156	1,544
	Test (T_T)	104,100	208,900	158,200	14,030	18,740

4 BESLUIT

In deze studie werden drie verschillende deeltaken uitgevoerd.

Allereerst werden de voorwaarden opgesteld die het ENVI-met model stelt aan een meetcampagne. Deze tekst werd gebruikt bij de IPL prijsvraag *Vegetatie en Luchtkwaliteit* en geeft aan welke zaken (ideaal gezien) moeten opgemeten worden voor een validatie oefening van het model. Het zijn hoofdzakelijk de structurele parameters van de beplanting die aangegeven moeten worden.

Vervolgens werd de vegetatiemodule van ENVI-met grondig onder de loep genomen. Verschillende van de deelprocessen die een rol spelen bij de interactie van vegetatie met luchtkwaliteit werden geanalyseerd en de parameterisaties van ENVI-met werden getoetst met bestaande literatuur.

Tot slot werd een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de belangrijkste parameters van een vegetatie element. Hierbij werden zowel de structurele parameters van het element (hoogte, breedte, dichtheid) als het type (loofbomen versus naaldbomen) van de vegetatie bekeken alsook het effect van de windsnelheid. Uit al de analyses bleek dat significante effecten op de deeltjes- en gasconcentraties kunnen bekomen worden. Hieruit kan besloten worden dat de geometrie en de positie van het lijnelement een positieve bijdrage kunnen leveren aan de totale reductie van luchtverontreiniging. Hierbij is het noodzakelijk om op te merken dat de concentratiereducties achter het element niet overal optreden en dat er op sommige locaties ook verhogingen kunnen ontstaan. De plaats waar deze veranderingen in concentratie optreden, is zeer afhankelijk van de windsnelheid maar duidelijke effecten zijn steeds aanwezig kort achter de beplanting. Het type vegetatie lijkt op basis van deze eerste studie voor NO₂ geen impact te hebben op de concentratieverlaging achter het element. Voor PM₁₀ werd aangetoond dat de aerodynamische bladweerstand een zeer cruciale parameter is waarover relatief weinig gekend is. Naast de verstoring van het windveld, kan het filterend vermogen van een vegetatief element een substantiële impact op de verlaging van de PM₁₀ concentratie achter het element.

5 REFERENTIES

Braden, H. (1982), Simulationsmodell für den Wasser-, Energie- und Stoffhaushalt in Pflanzenbeständen. Rep. Inst. Meteorol. Uni. Hannover, 23

Breuer, L., Eckhardt, K., Frede, H.-G., (2002), Plant parameter values for models in temperate climates. *Ecological Modelling* 169, 237-293.

Bruse M. and Fleer H. (1998), Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model, *Environmental Modelling & Software* 13, 373-384

Bruse M. (2004), ENVI-met implementation of the Jacobs A-gs model to calculate the stomata conductance, www.emvi-met.com

Bruse M. (2007), ENVI-met implementation of the gas/particle dispersion and deposition model PDDM, www.emvi-met.com

Freer-Smith, P.H., Beckett, K.P., Taylor, G. (2005), Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* x *tricarpa* 'Beaupré', *Pinus nigra* and *X Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. *Environmental Pollution* 133, 157-167.

Hanson, P.J., Lindberg, S.E. (1991), Dry deposition of reactive nitrogen compounds: A review of leaf, canopy and non-foliar measurements. *Atmospheric Environment* 25A, 1615-1634.

Jacobs, C. M. J. (1994), Direct impact of atmospheric CO₂ enrichment on regional transpiration. PhD thesis, Wageningen Agricultural University

Lenzian, K.J., Kerstiens, G. (1991), Sorption and transport of gases and vapors in plant cuticles. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 121, 65-128.

Liu J. et al. (1996). E-ε modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge, *Boundary Layer Meteorology*, 77, 21-44

Murphy, C.E. Jr, Sigmon, J.T. (1990), Dry Deposition of Sulfur and Nitrogen Oxide Gases to Forest Vegetation. In: Lindberg, S.E., Page, A.L., Norton, S.A. (Eds), *Acidic Precipitation Volume 3: Sources, Deposition and Canopy Interactions*. Springer-Verlag, New York, USA, pp. 217-240.

Naot, O. and Mahrer, Y. (1989), Modelling microclimate environments: A verification study. *Boundary Layer Meteorology* 46, 333-354.

Seinfeld, J.H. and Pandis S.N. (2007), Atmospheric chemistry and physics. Wiley-Interscience, New York.

Schilling, V. K. (1990). A parameterization for modelling the meteorological effects of tall forests— A case study of a large clearing. *Boundary Layer Meteorology* 55, 283–304.

Sleuwaert F., Polders C., Van Rompaey H., Schrooten L., De Vlieger I., Berghmans P., Vanderreydt I., Bleux N., Janssen L., Vankerkom J., (2006). Optimalisatie en actualisatie van de emissie-inventaris fijn stof in het kader van internationale ontwikkelingen, Studie uitgevoerd in opdracht van VMM, VITO-2006/IMS/R/391

van den Burg A., Swaagsta H., Loef P., Broer W., Cohen G. (2006), Kennisdocument Vegetatie-luchtkwaliteit ten behoeve van het uitvoeren van een pilotproject langs rijkswegen, DWW 2006-094 /IPL 06.00019

Vankerkom J., F. Lefebvre, I. De Vlieger, E. Cornelis, L. Schrooten, E. Peetermans, C. Puttemans, K. Verlinden, (2005). Gecombineerd gebruik van verkeerstellingen en TRIPS/32 modeloutput binnen MIMOSA: implementatie, validatie en afstemming met TEMAT en FOD mobiliteit (MIMOSA 3) (eindrapport). VITO-2005/IMS/R/1681.

BIJLAGE A MINIMALE RANDVOORWAARDEN OPGELEGD DOOR HET ENVI-MET MODEL

A.1 INLEIDING

Dit addendum aan het IPL Kennisdokument vegetatie-luchtkwaliteit (DWW 2006-094/IPL 06.00019) heeft tot doel om voor deze prijsvraag een aantal zaken scherper te stellen vanuit het oogpunt van het ENVI-met model. In dit document worden (bijkomende) randvoorwaarden gepreciseerd die het ENVI-met model oplegt aan de meetcampagnes rond lineaire groenstructuren (zoals bijvoorbeeld bomenrijen), zowel wat betreft de vegetatie als de meteorologische en chemische parameters. Voor een algemeen overzicht wordt verwezen naar het Kennisdokument waar reeds uitgebreid wordt ingegaan op het opzet van de meetcampagne en de noodzakelijke parameters voor de modelvalidatie.

ENVI-met is een 3D numeriek stromingsmodel (CFD – Computational Fluid Dynamics) waarbij het te simuleren domein opgedeeld wordt in een eindig aantal discrete punten. Het grid dat op die manier ontstaat, bestaat uit reguliere kubusvormige cellen. Per cel worden een aantal fysische parameters berekend zoals windsnelheid en richting, temperatuur, vochtigheid, concentraties van deeltjes en gassen. De resolutie van een cel bedraagt 1 tot 10 meter en een typisch domein beslaat uit $60 \times 60 \times 30$ roostercellen. Afhankelijk van de complexiteit van het domein en de beschikbare reken capaciteit kan dit uiteraard uitgebreid worden. Een typisch (maar eerder complex) modeldomein van ENVI-met wordt getoond in Figuur A.1.



Figuur A.1: Typisch modeldomein van ENVI-met met een mix van bebouwing (zwart) en verschillende types vegetatie (groen).

ENVI-met is ontwikkeld door het team van Prof. Michael Bruse van de Universiteit van Bochum (www.envi-met.com) en uitgebreid met een luchtkwaliteitmodule door VITO (www.vito.be).

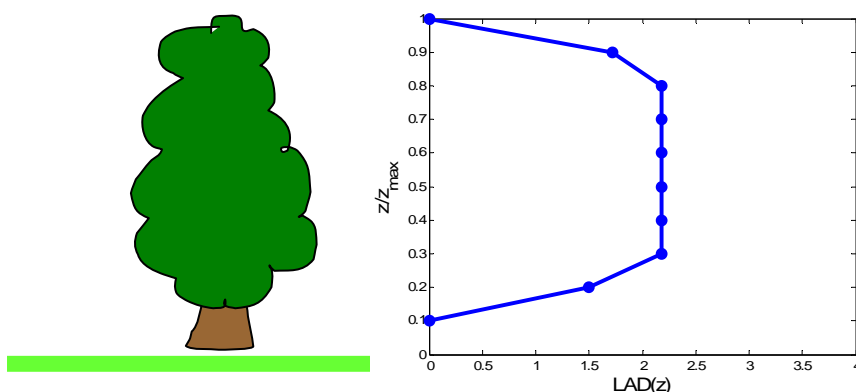
A.2 VEGETATIE

ENVI-Met onderscheidt zich van andere stedelijke CFD-modellen door de gedetailleerde wijze waarop vegetatie in rekening wordt gebracht. Aan elk kubusvormig element van het discrete modeldomein kunnen bepaalde fysische eigenschappen verbonden worden die effect kunnen hebben op de aerodynamische stroming en het gedrag van deeltjes en gassen. In geval van vegetatie wordt een element als een meer of minder poreus element beschouwd dat weerstand biedt tegen de stroming en bovendien in staat is stof en gassen op te nemen (absorptie van gassen in de stomata, invangen van deeltjes) of de samenstellingen te wijzigen. De mate waarin dit gebeurt, hangt af van de lokale klimatologische omstandigheden, de concentraties van luchtverontreiniging en van de biologische eigenschappen van de vegetatie. De impact kan bijgevolg sterk variëren in tijd (seizoensgebonden, weersafhankelijk ...) maar ook lokaal in ruimte (vorm en dichtheid van de kruin).

Om een representatieve modellering te kunnen uitvoeren is een beschrijving van de vegetatie vereist. Hierbij moeten volgende zaken in rekening worden gebracht:

- Gedetailleerde beschrijving van de proeftuin op een grondplan met een nauwkeurigheid overeenkomstig de maximale resolutie van het modelgrid (1m). Bij de kartering van het vegetatie-element moet de specifieke plek van een soort in het element beschreven worden alsook de hoogte, diameter en vorm van de vegetatie. Afhankelijk van de variatie van de parameter (bv. in groeiseizoen) worden metingen gedurende de meetcampagne herhaald. Voor een uniform element zijn gemiddelde waarden per tijdstip van de meetcampagne voldoende.
- Gedetailleerde biologische beschrijving van de verschillende plantensoorten (bomen, struiken, kruidlaag) en van de wijze waarop het vegetatie-element uit deze soorten is opgebouwd (soortsamenstelling in de langsrichting en in de hoogte van het element). Belangrijk zijn onder andere de Latijnse benaming, morfologische kenmerken, wel of niet groenblijvend, vorm, gezondheid en groei. De kartering moet worden uitgevoerd met een nauwkeurigheid overeenkomstig de maximale resolutie van het modelgrid (1m).
- Beschrijving van het gemiddeld bladoppervlak per kubieke meter (leaf area density, LAD [m^2/m^3]) in het element als functie van de hoogte z . ENVI-met laat toe om op 10 verschillende hoogtes de LAD(z) in te geven, te meten vanaf de bodem tot de top van de kruin. Een typisch LAD-patroon wordt schematisch voorgesteld in Figuur A.2. Hierbij moeten volgende zaken in acht genomen worden:
 - Op de hoogte z waar de LAD(z) wordt bepaald, dient ook de diameter van de vegetatiestrook afgeschat te worden.

- De tijdsresolutie van deze LAD(z)-metingen dient bepaald te worden in relatie tot de waarneembare veranderingen van de vegetatie. In de loop van de meetcampagne moeten dus mogelijk verschillende LAD-metingen uitgevoerd worden.
- Wanneer de vegetatie uit verschillende (horizontale) lagen zou bestaan, dient men er rekening mee te houden dat men slechts op tien hoogtes een LAD-waarde kan invoeren. In dat geval is het ook noodzakelijk om bij elke hoogte te vermelden om welk type vegetatie het gaat.



Figuur A.2: Schematische voorstelling van een LAD-profiel.

Indien de vegetatie een voldoende mate van uniformiteit vertoont in de langsrichting van het groenscherm, volstaat het om representatieve parameters te bepalen voor het volledige groenscherm. De variatie in de hoogte z moet uiteraard wel in rekening worden gebracht. Om de randeffecten aan de uiteinden van het groenscherm uit te sluiten in de metingen, is het noodzakelijk dat het groenscherm voldoende lang is. Een lengte van 100m wordt als een absolute ondergrens beschouwd.

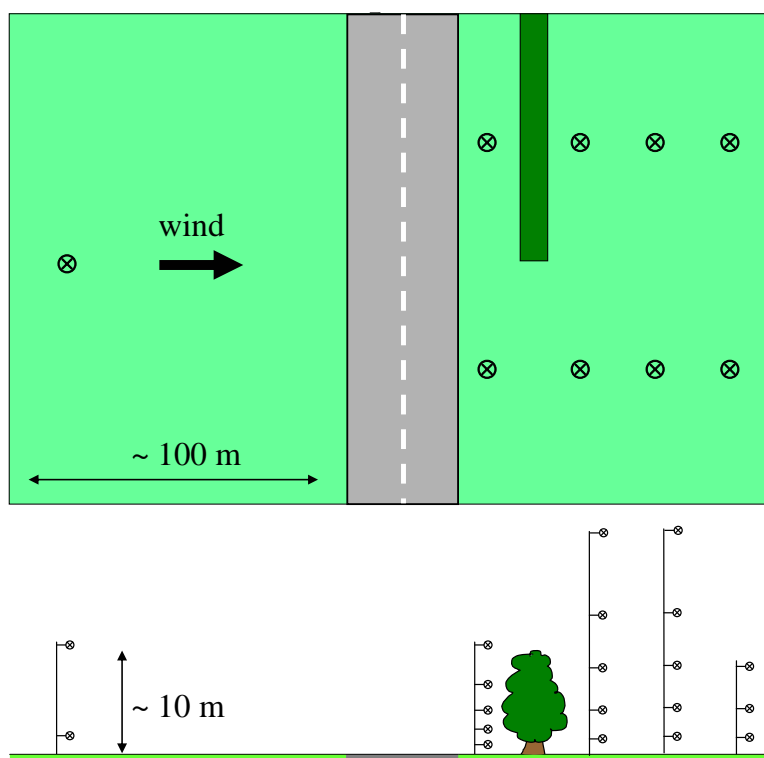
Naast de LAD wordt de vegetatie in ENVI-met beschreven door een set van een 20 tal parameters. De meeste van deze parameters zijn soortspecifiek en zullen bepaald worden uit de literatuur. De invulling van deze parameters op basis van het literatuuronderzoek maakt geen deel uit van de prijsvraag en zal worden uitgevoerd door het ENVI-met team van VITO en Triple E. Het spreekt voor zich dat een nauwkeurige beschrijving van de vegetatie-element wel essentieel is.

A.3 METEOROLOGISCHE EN CHEMISCHE PARAMETERS

Bij het meten van de meteorologische en chemische parameters dient onderscheid gemaakt te worden tussen parameters die noodzakelijk zijn als randvoorwaarden voor het model en variabelen die gebruikt kunnen worden ter validatie van het model en het vaststellen van het effect van vegetatie op luchtkwaliteit. Zowel de randvoorwaarden van het model als de parameters voor de validatie moeten door de opdrachtnemer opgemeten worden. In Tabel 9 wordt een overzicht gegeven van de noodzakelijke invoerparameters van ENVI-

met. Parameters die gebruikt zullen worden bij de validatie van het model en de vaststelling van het effect van vegetatie op luchtkwaliteit zijn samengevat in Tabel 10.

Het opmeten van deze parameters moet met de nodige zorg en de hoogst mogelijke nauwkeurigheid gebeuren om een geslaagd experiment en een zinvolle validatie van het model mogelijk te maken. Hierbij moet rekening gehouden worden met zowel de locatie als tijdsresolutie van de metingen. In §6.3 van het Kennisdocument wordt reeds uitgebreid ingegaan op een aantal opstellingsvereisten van de proeflocatie. In deze paragraaf wordt hier dieper op ingegaan.



Figuur A.3: Mogelijke proefopstelling voor een meetcampagne.

Een mogelijke proefopstelling wordt weergegeven in Figuur A.3. Deze figuur is zeker niet bindend voor het projectvoorstel van de opdrachtnemer. Ze bevat anderzijds wel een aantal elementen die noodzakelijk zijn voor een succesvolle uitvoering van het experiment. Deze kunnen als volgt samengevat worden:

- Om een optimaal effect te bereiken moet de proeftuin ingericht worden rekening houdend met de meest voorkomende windrichting.
- Om een effect van het groenelement te kunnen vaststellen zijn twee meetassen noodzakelijk. Eén as door het element, een andere evenwijdige meetas zonder landschapselement. Vergelijking van de beide meetreeksen moet toelaten om het effect van vegetatie op de luchtkwaliteit in te schatten.

- De aanwezigheid van een ongestoord referentiepunt bovenwinds (in de meest voorkomende windrichting, min. 100m vanaf de weg) is essentieel om een inschatting te kunnen maken van de achtergrond concentraties van de luchtvervuiling en de meteorologische parameters. In dit punt moet ook een achtergrond meting uitgevoerd worden voor de CO₂ concentratie. Deze grootheid wordt in ENVI-met gebruikt om de stomatale weerstand van de vegetatie te bepalen.
- Een meetpunt tussen de weg en het groenscherm is belangrijk om het opstuwende en afremmende effect van het groenscherm in kaart te brengen. De mate waarin dit effect speelt, bepaalt immers in hoeverre het windveld vertraagt en de atmosfeer bijkomende emissies van het verkeer kan opnemen.
- Het effect van het groenscherm strekt zich uit tot 15 à 20 maal de hoogte van het obstakel. Hiermee moet rekening gehouden worden bij de keuze van de locaties van de verschillende meetpunten achter de vegetatie. De metingen moeten immers een zo goed mogelijk beeld geven van het volledige fenomeen dat veroorzaakt wordt door de inplanting van het groenscherm.
- Om een nauwkeurig onderscheid te kunnen maken tussen de luchtstroming die door het poreuze groenscherm filtreert en deze die over het groenscherm wordt afgebogen (zie §3.6 in Kennisdocument), is het wenselijk om zowel voor als achter het groenscherm te beschikken over een aantal meetpunten op verschillende hoogtes.
- De twee hierboven beschreven luchtstromingen hebben een verschillende impact op de concentraties net achter het groenscherm. Om beide effecten duidelijk te onderscheiden en te bestuderen, kan gebruik gemaakt worden van een tracer element waarbij het filterend effect van de vegetatie wegvalt. De voorkeur gaat uit naar een tracer element dat door het wegverkeer wordt uitgestoten en bijgevolg volledig gemengd is met de andere componenten die lokaal geëmitteerd worden.
- ENVI-met werkt met massa concentraties (typisch $\mu\text{g}/\text{m}^3$) voor de chemische pollutanten. Wanneer voor deeltjes toch aantallen concentraties worden bepaald, moet de conversie naar massa correct uitgevoerd worden.
- De tijdsresolutie en de frequentie van de metingen in de verschillende meetpunten dient zo goed mogelijk op elkaar afgestemd te zijn. Dit is wenselijk zodat op elke tijdstap een volledig beeld kan gevormd worden van het (chemisch) stromingspatroon in de proeftuin.
- ENVI-met werkt met tijdstappen van enkele seconden maar typisch wordt output weggeschreven op een uurlijkse basis. In het kader van dit onderzoek is een uurlijkse resolutie van de metingen wenselijk voor de validatie van ten minste een aantal episodes. Hogere tijdsresoluties zijn uiteraard welkom. Voor langere periodes kunnen ook geïntegreerde chemische metingen aangewend worden om het gecumuleerde effect van vegetatie op luchtkwaliteit in kaart te brengen en het model te valideren. Tijdens deze langere periode is het dan wel essentieel dat de noodzakelijke invoerparameters van het model (zie Tabel 9) op uurlijkse

basis opgemeten worden zodoende voldoende randvoorwaarden voor de modelruns beschikbaar te hebben.

- Het is algemeen bekend dat het wegverkeer in zijn onmiddellijke omgeving turbulenties veroorzaakt. Deze turbulenties hebben een impact op de verspreiding van de uitgestoten emissies. Door de aanwezigheid van het groenscherm zal het turbulentiepatroon bijkomende veranderingen ondergaan. Het zou wenselijk zijn om in het meetpunt tussen de weg en het groenelement te kunnen beschikken over turbulentiemetingen (TKE) om de modelberekeningen te valideren voor deze essentiële parameter. In het referentiepunt kan dan een gelijkaardige referentiemeting uitgevoerd worden.

Tabel 9: Noodzakelijke randvoorwaarden van het ENVI-met model. Deze parameterset dient bepaald te worden in het ongestoorde bovenwinds "referentiepunt".

Notatie	Parameter	Eenheid
W	windsnelheid op 10m hoogte	m/s
ϕ	windrichting (0:N..90:E..180:S..270:W..)	°
T (2m)	temperatuur op 2m hoogte	K
q (2m)	relatieve vochtigheid op 2m hoogte	%
cloud cover of R_{dir}	bewolking (op lage, midden en grote hoogte) of directe straling	x/8 W/m ²
r	neerslag	mm/u
η	bodemvocht op diepte 0-20cm / 20cm-50cm/dieper dan 50cm (representatieve meting voor de hele proeftuin)	%
TKE	Turbulente kinetische energie	m ² /s ²
C ₀	Achtergrondconcentratie voor de te onderzoeken polluenten + CO ₂	µg/m ³

Tabel 10: Noodzakelijke parameters voor de validatie van het ENVI-met model. In de kolommen "Loef" en "Lij" wordt aangegeven welke parameters respectievelijk voor en achter het element moeten worden gemeten: (1) minstens op één hoogte en locatie, (x) op meerder hoogtes en/of locaties is wenselijk.

Notatie	Parameter	Eenheid	Loef	Lij
C	Massa concentraties (PM10, PM2.5, PMx, NOx, NO2, O3)	µg/m ³	x	x
W	Windsnelheid	m/s	x	x
ϕ	Windrichting (0:N..90:E..180:S..270:W..)	°	x	x
T	Temperatuur	K	1	1
q	Specifieke vochtigheid v/d lucht	g/kg	1	1
TKE	Turbulente kinetische energie	m ² /s ²	1	-