Optimalisatie van geluidsschermen voor verbetering van de luchtkwaliteit

P. Hofschreuder (A&F)
F. Tonneijck (PRI)
E. Hofschreuder (Sight)

Rapport 538



Optimalisatie van geluidsschermen voor verbetering van de luchtkwaliteit

P. Hofschreuder (A&F)
F. Tonneijck (PRI)
E. Hofschreuder (Sight)

Rapport #

Colophon

Deze studie is onder verantwoordelijkheid van Agrotechnology and Food Innovations afdeling Livestock Environment in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat uitgevoerd door;







Title	Optimalisatie van geluidsschermen voor verbetering van de luchtkwaliteit
Author(s)	P. Hofschreuder, F. Tonneijck, E. Hofschreuder
A&F number	Insert A&F report number
ISBN-number	If applicable, insert ISBN-number
Date of publication	August 2005
Confidentiality	Ja. Toestemming voor gebruik van resultaten aan te vragen bij RWS-DWW
Project code.	630-5490100

Agrotechnology & Food Innovations B.V.
P.O. Box 17
NL-6700 AA Wageningen
Tel: +31 (0)317 475 024
E-mail: info.agrotechnologyandfood@wur.nl
Internet: www.agrotechnologyandfood.wur.nl

© Agrotechnology & Food Innovations B.V.
Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, hetzij mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.
All right reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publisher. The publisher does not accept any liability for the inaccuracies in this report.

This report is authorised by: dr. N.W.M. Ogink (afdelingshoofd A&F afdeling LE)



The quality management system of Agrotechnology & Food Innovations B.V. is certified by SGS International Certification Services EESV according to ISO 9001:2000.

Voorwoord

Deze studie werd uitgevoerd in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW) van Rijkswaterstaat in het kader van het Innovatie Programma Luchtkwaliteit. Doel van de studie is na te gaan of door aanpassing van het ontwerp van geluidsschermen verbeteringen in de luchtkwaliteit in de nabijheid van het scherm kunnen worden verkregen. Daartoe zijn voorstellen uit een door RWS DWW georganiseerd ontwerpatelier ter hand genomen en op hun bruikbaarheid getoetst.
De beperkte hoeveelheid beschikbare gegevens in de literatuur en de wens om toch kwantitatieve uitspraken te doen zonder een complex simulatiemodel te gebruiken hebben geleid tot het gebruik van eenvoudige benaderingen en een aantal aannamen om de werking van een aantal schermontwerpen door te kunnen rekenen.
Op grond van deze benadering dienen de resultaten als indicatief te worden opgevat.

Abstract

Violations of air quality standards along highways in urban areas prompted to study the feasibility of optimizing the design of sound screens to improve air quality. The use of porous screens and addition of vegetation on the surface of the screen are evaluated as well as open vegetated screens in front of the sound screen and optimized belts with trees and shrubs behind the sound screen.
A lot of other suggested solutions like placing of windmills, water spraying, electrostatic precipitation, air filtering and use of an air jet on top of the sound screen were considered as well. All suggestions were rejected for lack of effectiveness, maintenance costs and danger except the vegetation and the air jet.

Quantitative improvement of air quality is estimated using a simple K-type dispersion model, using empirical additional dilution factors for the obstacles and a resistance model for deposition. A green shelterbelt is very effective in lowering concentrations of PM-10 in air. The lowering of the concentration is in general related to the surface area of the vegetation and/or the increase in surface by using a porous screen. Additional dilution because of the height of the screen and/or vegetation and air jet is also effective in cutting down concentrations.

Increasing dilution of polluted air helps also in decreasing concentrations of NO_x. Increasing the surface is not effective as the surface resistance for NO_x is high. Reducing the surface resistance with a catalyst helps, but increasing the surface is the major problem than.

Keywords; air quality, highway, PM-10, NO_x, sound screen, shelterbelts, vegetation, reduction, concentration.

Inhoud

Voorwoord **3**

Abstract **5**

Inhoud **7**

1 Inleiding **9**

2 Doelen van het project **11**

3 Theorie **13**

3.1 Stroming rond schermen 13

3.1.1 Stroming en verspreiding van verontreiniging in ongestoord terrein 13

3.1.2 Invloed van het verkeer op de stroming 15

3.1.3 Verloop van emissies en concentraties in de tijd 15

3.1.4 Invloed van obstakels op de stroming en de concentratie 18

3.1.5 Beïnvloeding van de stroming 21

3.2 Vorming en verdwijning van verontreiniging 25

3.2.1 Droge depositie van fijn stof en NO_x 25

3.2.2 Natte depositie 27

3.2.3 Chemische reacties 28

3.2.4 Verhoging van de contactmogelijkheden en vergroting van het vangend oppervlak met passieve constructies 28

3.2.5 Opname van luchtverontreiniging door groene geluidsschermen 29

3.2.6 Vernevelen van water 33

3.2.7 Elektrostatische precipitatie 34

3.2.8 Filtratie met filters 35

4 Samenvatting van de theorie in de richting van oplossingen **37**

5 Overzicht van geluidsschermen **39**

5.1 Algemeen 39

5.2 Schermtypen 39

5.2.1 Recht scherm 39

5.2.2 Scherm onder een hoek 40

5.2.3 Gebogen scherm 40

5.2.4 Middenbermscherm 40

5.2.5 Schermtoppen 40

5.2.6 Poreuze schermen 41

5.2.7 Scherm voorzien van een luchtscherm 42

6 Optimalisatie van schermontwerp voor verbetering van de luchtkwaliteit **43**

6.1 Overwegingen bij de keuze van een schermontwerp 43

6.2 Score van een aantal schermconfiguraties op de ontwerp criteria. 44

6.3 Koppeling van ontwerpen eisen voor verbetering van de luchtkwaliteit aan eisen ter vermindering van geluidsdruk 45

7 Schatting van de verbetering in de luchtkwaliteit als gevolg van verbeterd scherm ontwerp. 49

7.1 Berekeningen voor fijn stof 49

7.2 Werking van schermen voor NO_x 58

8 Discussie 59

9 Samenvatting en conclusies 61

10 Aanbevelingen 63

11 Literatuur 65

Verklarende woorden lijst 69

Bijlage 1 Schatting van de invloed van scherm ontwerp op concentraties naast een weg. 71

Bijlage 2 Berekende concentraties en percentuele reducties voor situaties zonder scherm, met een kaal scherm en schermen diverse soorten begroeiing. 87

1 Inleiding

Recente ontwikkelingen in de normstelling voor de luchtkwaliteit binnen de EU en de daarop gebaseerde jurisprudentie van de Raad van State scheppen voor een dicht bevolkt land als Nederland grote problemen op planologisch gebied. De emissies in Nederland uitgedrukt per bruto nationaal product of per hoofd der bevolking wijken weinig af van de rest van Europa (EU-City-Delta), door de grote bevolkingsdichtheid zijn de emissies per vierkante kilometer echter hoog. De beperkte ruimte vergt het dicht bij elkaar aanwezig zijn van verschillende vormen van landgebruik. Eén van de duidelijke problemen vormt de nabijheid van woonbebouwing en belangrijke verkeerswegen (Geurs et al, 2004). In de huidige situatie resulteren normoverschrijding en belangenconflicten in verboden op uitbreiding van woonwijken langs snelwegen, beperkingen of verboden om de wegcapaciteit te vergroten en acties van bewoners.

Emissiereducerende maatregelen kunnen plaatsvinden aan de bron (emissie eisen EU), of door variabilisatie van de autokosten (Geurs et al, 2004). In het laatste geval kan de milieuwinst tussen 0 en 10% bedragen. Aanpak aan de bron lijkt het meest voor de hand liggend, doch heeft op korte termijn onvoldoende resultaat. Er zal nog een aantal jaren normoverschrijding plaats vinden. Aanvullend lokaal beleid is daarom nodig (Beck et al,2005). Deze maatregelen kunnen worden doorgevoerd los van emissiereducerende maatregelen in EU verband, die voor de Nederlandse luchtkwaliteit op een te laat tijdstip komen (Beck et al,2005). Een eerste inschatting van lokale maatregelen is dat de milieueffecten in de directe omgeving van een weg even groot kunnen zijn als de directe maatregelen.

Geluid was reeds eerder een belangrijk punt, waar bij het inrichten van wegen rekening mee werd gehouden. De kwaliteit van de lucht op plaatsen waar normen worden overschreden en mogelijkheden en maatregelen om deze kwaliteit te verbeteren krijgen volop aandacht (Beck et al, 2005, CROW, 2005). Vraag is nu, of geluidsschermen zodanig kunnen worden ontworpen, dat deze ook een functie kunnen hebben in verlaging van de concentraties aan luchtverontreiniging achter de schermen, dan wel dat aan andere oplossingen kan worden gedacht om de luchtkwaliteit langs drukke wegen te verbeteren. Optimalisatie van schermen voor beide doeleinden kan potentieel leiden tot belangrijke verbetering van het leefmilieu, maar wordt ook in relatie tot verkeersplanning en ontwikkelingsmogelijkheden voor bouw van groot economisch belang geschat.

Stroming rond schermen, chemische reacties en depositie van verontreiniging kunnen zorgen voor verdunning, vermindering of verhoging van de concentraties in de lucht door reacties en vermindering door verlies aan oppervlakken. De verliezen kunnen worden vergroot door reacties te stimuleren, de vangstefficiëntie te verhogen of de binding aan oppervlakken te versterken. De theorie ten aanzien van deze processen wordt in hoofdstuk drie behandeld om een basis te vormen voor beoordeling van bestaande- en in de toekomst te ontwikkelen (geluids)schermen. Na samenvatting van de theorie in de richting van oplossingen (hoofdstuk4), wordt in hoofdstuk

5 een overzicht gegeven van de ontwikkeling in geluidsschermen. Omdat deze schermen niet zijn geoptimaliseerd voor het tegengaan van blootstelling aan hoge concentraties luchtverontreiniging, wordt in hoofdstuk 6 ingehaakt op de ontwikkelingen ten aanzien van nieuwe geluidsschermen, maar wordt daar ook aandacht besteed aan ontwerp criteria voor schermen, die zijn geoptimaliseerd voor verbetering van de luchtkwaliteit. Daarbij dienen uiteraard de voor- en nadelen van bepaalde oplossingen te worden afgewogen. Tenslotte worden de ontwerpeisen voor verbetering van de luchtkwaliteit gelegd naast die voor reductie van de geluidsbelasting.
De theoretische benadering heeft het voordeel, dat open naar het probleem wordt gekeken en op deze wijze ook minder voor de hand liggende oplossingen de revue passeren. Voor de praktijk is ook van belang in te schatten welke verbetering van bepaalde oplossingen verwacht mag worden. Die vraag wordt in hoofdstuk 7 gesteld en voor zover er literatuur over beschikbaar is beantwoord. Het rapport wordt afgesloten met een samenvatting met conclusies (hoofdstuk 9) en aanbevelingen voor nader onderzoek.

Het onderzoek kent ook een aantal beperkingen. Esthetische vormgeving en ervaring door bewoners en verkeersdeelnemers vormt geen punt van aandacht. Aan zaken als eventuele groeiplaatseisen van beplanting, onderhoud en veiligheid wordt slechts beperkt aandacht besteed. Economische evaluatie van constructies en bouwtechnische eisen vallen eveneens buiten dit bestek.

2 Doelen van het project

Het project is inventariserend en beschrijvend en kent de volgende doelen;

1. Beschrijving van stroming, turbulentie en menging in de lucht rond schermen.
2. Beschrijving van de mechanismen om verontreiniging te verwijderen.
3. Inventarisatie van veel voorkomende typen schermen en hun theoretische score ter vermindering van de luchtkwaliteit
4. Afleiden van ontwerpfactoren uit voorgaande inventarisatie, theorie en beoordeling van hun bijdrage aan verbetering van de luchtkwaliteit.
5. Schatting van de invloed van een optimaal ontwerp op de luchtkwaliteit .
6. Vergelijking van ontwerpcriteria voor luchtkwaliteit en voor geluid en aangeven naar een optimaal ontwerp.
7. Aangeven hoe het toetsen van de verbetering in luchtkwaliteit in de praktijk door modellen, windtunnelmetingen of meten aan bestaande systemen kan plaatsvinden.

3 Theorie

3.1 Stroming rond schermen

3.1.1 Stroming en verspreiding van verontreiniging in ongestoord terrein

Stroming over een weg zorgt voor verdunning van de op de weg uitgestoten verontreiniging. Bij een windrichting dwars op de lengterichting van de weg kunnen we ons gemakkelijk voorstellen, dat de optredende concentraties langs de weg omgekeerd evenredig zijn met de windsnelheid. Bij een twee keer zo hoge windsnelheid wordt de verontreiniging in twee keer zoveel lucht opgenomen en is de concentratie de helft ten opzicht ven de uitgangssituatie;

$$C \cong Q \diagup \bar{u} \qquad (1)$$

Met Q = bronsterkte (g s^{-1})
$\bar{u}$ = gemiddelde windsnelheid (m s^{-1})

Uit de meteorologie is verder bekend, dat de windsnelheid in een evenwichtssituatie met constante ruwheid van het terrein toeneemt met de hoogte. Onder atmosferisch neutrale condities hebben we te maken met een logarithmisch windsnelheidsprofiel (Wieringa en Rijkoort, 1983).

$$U_z = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z-D}{z_0}\right) \qquad (2)$$

Met ; U_z = windsnelheid op hoogte z (m s^{-1})
k = von Karmann constante (0.4)
u* = wrijvingssnelheid (m s^{-1}) *)
z = hoogte (m)
D = nulvlaksverplaatsing door hoge vegetatie (m) (0.6-0.7 maal hoogte vegetatie) *)
z_0 = ruwheidslengte van de vegetatie (m) *)

Onder stabiele – en onstabiele condities wijkt het profiel enigszins af van het weergegeven logarithmisch profiel. Van praktisch belang is het besef dat een ten opzichte van de omgeving verhoogt aangelegde weg door de hogere windsnelheden (in ongestoorde condities) bij dezelfde bronsterkte aanleiding geeft tot een lagere bijdrage aan de concentraties in de lucht dan een vlak liggende weg. Een verdiept aangelegde weg zal boven de weg door geringere opmenging iets hogere concentraties te zien geven.
De vergelijking voor het logarithmisch windsnelheidsprofiel laat verder zien, dat bij kleine waarden van de ruwheidslengte (z_0) de windsnelheid boven de vegetatie ($z>z_0 + D$) snel toeneemt met de hoogte en bij grote ruwheid veel langzamer. Gebruikelijke waarden van z_0 voor gras, bouwland met obstakels, klein stedelijk gebied en stedelijk gebied met hoogbouw zijn 0.1; 0.25; 1.0 en 3.0 m. Hierdoor zullen de concentraties in stedelijk gebied hoger zijn dan bijvoorbeeld op dezelfde afstand tot de weg in het Hollands veengebied.
We hebben echter niet alleen te maken met horizontaal transport van verontreiniging met de

*) zie verklarende woordenlijst achter in dit rapport

wind mee. Turbulente menging zorgt voor verspreiding van de verontreiniging in zijdelingse richting en verticaal. Een eenvoudige aanname is Gaussvormige verspreiding in horizontale en verticale richting. Deze aanname vormt de basis voor veel Gaussische pluim modellen voor het uitvoeren van verspreidingsberekeningen (Turner, 1969, Van Jaarsveld, 1995, Erbrink, 1995, Hofschreuder 2004).
De verspreidingsformule in meest eenvoudige vorm luidt;

$$C(x,y,z;H) = \frac{Q}{2\pi.\bar{u}.\sigma_y.\sigma_z}\exp\left(-1/2\left\{\frac{y}{\sigma_y}\right\}^2\right).\exp\left(-1/2\left\{\frac{z-H}{\sigma_z}\right\}^2\right) \quad (3)$$

Dit is de formulering voor een puntbron met uitworp op hoogte H. x, y en z zijn respectievelijk de afstand tussen bron en receptor, de horizontale afstand tot de pluimas en verticale afstand tot de pluimas (drie dimensionaal assenstelsel). Sigma y is de standaarddeviatie van de verspreiding in horizontale richting en sigma z in de verticaal.
Ogenschijnlijk lijkt er geen relatie te zijn met de afstand tot de bron. Dit is echter schijn. Ten eerste omdat we rekenen met een continue bron. Alles wat door de wind wordt weggevoerd wordt weer door de bron aangevuld. Ten tweede zijn de verspreidingsparameters sigma y en sigma z afhankelijk van de standaarddeviatie van de windrichting in v resp. w richting en de afstand. Voor korte afstanden (tot 1 km) geldt (Hanna, 1981);

$$\sigma_y \approx \sigma_v\left(\frac{x}{\bar{u}}\right) \text{ en } \sigma_z \approx \sigma_w\left(\frac{x}{\bar{u}}\right) \quad (4)$$

De waarden voor sigma v en sigma w zijn afhankelijk van de atmosferische stabiliteit. De waarden zijn relatief groot voor onstabiele atmosferische situaties en klein voor stabiele situaties. Het valt eenvoudig in te zien, dat hoge concentraties vooral optreden bij kleine waarden voor sigma y en sigma z (dus stabiele omstandigheden).
Voor een weg hebben we niet te maken met een puntbron, maar met een bijna oneindige lijnbron. Dit betekent dat vergelijking (3) overgaat in;

$$C(x,z;H) = \frac{q}{\sqrt{2\pi}.\bar{u}.\sigma_z}\exp\left(-1/2\left\{\frac{z-H}{\sigma_z}\right\}^2\right) \quad (5)$$

Hierbij is q de lijnbronsterkte (gram m^{-1} s^{-1}).
De verspreiding van verontreiniging vindt alleen verticaal plaats. Horizontale diffusie in een bepaalde richting wordt gecompenseerd door tegengestelde diffusie (gemiddeld zullen alle luchtpakketjes evenveel naar links als naar rechts bewegen zodat er gemiddeld aan de concentratie niets verandert). Verlaging van de concentratie vindt bij een lijnbron dus alleen plaats door menging van de vuile lucht met schonere lucht van boven. Voor kruisingen en verkeerspleinen wordt de situatie gecompliceerder, omdat de emissie ter plaatse de som is van de emissies op de toeleidende wegen (afgezien van veranderingen door verandering in de verkeerssnelheid). De zijdelingse diffusie speelt dan wel een rol. De concentratie kan niet eenvoudigweg geschat worden als de som van de voor elk wegvak berekende concentratie.

3.1.2 Invloed van het verkeer op de stroming

Verkeer heeft zelf invloed op de stroming van de lucht. Afhankelijk van de stroomlijn van het voertuig zal dit de lucht min of meer als een zuiger voor zich uit duwen, waarbij de lucht langs alle zijden van het voertuig wegstroomt. De energie, die wordt ingezet om deze stromingsweerstand te overwinnen wordt vooral omgezet in turbulente energie. Dit betekent in de directe nabijheid van de weg meer turbulente menging en daarmee verdunning van de uitlaatgassen en bandenslijpsel. De wind krijgt een extra snelheidscomponent mee in de rijrichting van het verkeer. In open terrein is de verdunning aanvankelijk groter dan uit het Gaussisch lijnbron model van de vorige paragraaf geschat. De extra turbulentie sterft snel uit. In verspreiding modellen voor verontreiniging langs wegen wordt met deze initiële opmenging rekening gehouden door aan te nemen, dat tot een bepaalde hoogte boven de weg de lucht wordt gemengd. Er kan een spreiding van de concentratie boven de weg-as worden aangenomen, die reeds een zekere waarde heeft, bijvoorbeeld;

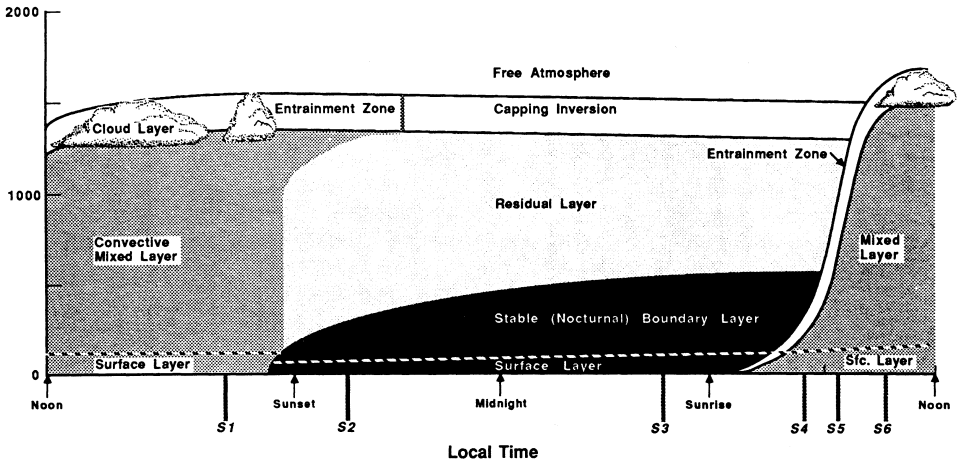
$$\sigma_z \approx \sigma_w \left(\frac{x}{u} \right) + 2.5 \quad (6)$$

De waarde 2.5 meter komt uit metingen langs de A50 (Hooghiemstra, 1987) en geeft aan dat bij aanname van de Gaussvormige verticale verdeling 95% van de emissies zich in een luchtpakket met een dikte van 2x2.5 = 5.0 meter bevindt. Dit is overigens de minimale waarde voor de initiële spreiding. De waarde varieert tussen 2.5 en 5.5 meter in afhankelijkheid van de verkeersdichtheid, windsnelheid en hoek van de gemiddelde windrichting met de weg (Hooghiemstra, 1987). In die tijd waren de vrachtwagens 3.85 m hoog en was het percentage vrachtwagens 20%. De opmenging zal van vrachtwagenhoogte (nu 4 m) en percentage vrachtwagens afhankelijk zijn en ook nog van de verhouding in emissies tussen vrachtwagens en personenwagens afhangen. Recentere gegevens ontbreken echter. Conclusie is, dat de emissies zich in een vrij dik luchtpakket boven de weg bevinden en dat dit van invloed is op de verdere verspreiding en verdunning van de verontreiniging, maar ook van invloed is op eventuele mitigerende maatregelen als extra verdunning of afvangst aan oppervlakken.

3.1.3 Verloop van emissies en concentraties in de tijd

Verkeersemissies kennen een duidelijk patroon, gerelateerd aan de verkeersintensiteit verdeling over de dag en de week. De meteorologie kent ook een verloop over de dag, dat schematisch in figuur 1 wordt weergegeven. Het verloop van de meteorologie en de verkeersemissies is daarmee niet onafhankelijk en schept de mogelijkheid kwalitatieve uitspraken te doen over de tijdstippen waarop hoge concentraties (en eventuele normoverschrijdingen zullen optreden).
Voor het begrip menglaag van figuur 1 een korte uitleg. Overdag straalt de zon energie in de vorm van zonnestralen in. Deze energie wordt aan de bodem omgezet in voelbare warmte, die voor een klein deel (10%) de bodem in gaat en voor een groot deel de lucht in gaat. De rest van de energie wordt gebruikt om water te verdampen en zorgt dus voor vocht in de atmosfeer. De verhouding tussen de hoeveelheid energie die via verdamping van vocht de lucht in gaat en via voelbare warmte de lucht in gaat is afhankelijk van de vochttoestand van de onderliggende

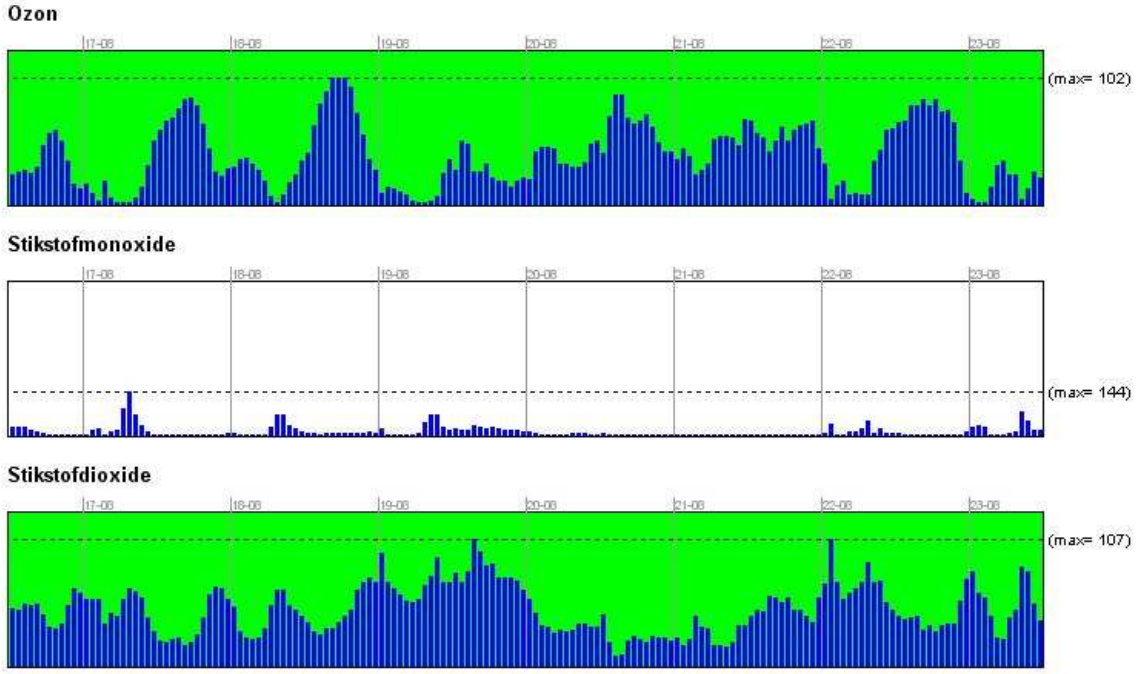
bodem/vegetatie. De voelbare warmtestroom zorgt met name voor opstijgende bellen warme lucht en daarmee voor menging van de atmosfeer.



Figuur 1 Schematisch verloop van de hoogte van de menglaag gedurende de dag (naar Stull, 1988). Het grijs gearceerde gebied geeft de dikte aan van de menglaag overdag, het zwart gearceerde gebied de dikte van de nachtelijke menglaag.

De tweede vorm van menging is door opwekking van turbulentie (mechanische turbulentie) doordat wind over een ruw oppervlak strijkt (vergelijk bos met een bevroren meer). De invloed van mechanische turbulentie neemt af met de hoogte doordat de wervels opbreken en energie verliezen en de bron zich dicht bij de grond bevindt. De thermische wervels kunnen in principe verder stijgen, doch verliezen ook energie door overdracht van warmte aan de omgeving. Gedurende dag zal vooral door de thermische turbulentie de laag waarin verontreiniging wordt opgemengd groeien. 's Nachts is er geen instraling maar gaat de warmte uitstraling (infrarood straling) wel door. Het oppervlak koelt af. De temperatuur in de lucht neemt toe met de hoogte (in plaats van een afnemende temperatuur van ongeveer 0.6 ^{o}C per 100 m voor vochtige lucht). Deze temperatuuropbouw fungeert dan als een soort deksel op de atmosfeer. Als de deksel (inversielaag) zich op lage hoogte bevindt is de laag waarin op grondniveau uitgeworpen verontreiniging zich bevindt dun en zullen de concentraties hoog kunnen worden. Wanneer een wolkendek aanwezig is zal de infrarode straling voor een deel worden teruggekaatst en koelt het oppervlak minder af. Deze (sterk vereenvoudigde) beschrijving geeft aan, dat de mechanische turbulentie intenser is (en de menging effectiever) als de windsnelheid hoog is. De windsnelheid is overdag doorgaans hoger dan 's nachts. De thermische turbulentie is hoog wanneer de instraling sterk is (hoge zonnestand, onbewolkt). De thermische turbulentie verdwijnt 's nachts en de mechanische turbulentie wordt onderdrukt als de afkoeling groot is (heldere windstille nacht).
De dynamiek van de atmosfeer kan in verband worden gebracht met het verloop van de verkeersintensiteit. De ochtend en avondspits zijn bekend evenals een klein piekje in de

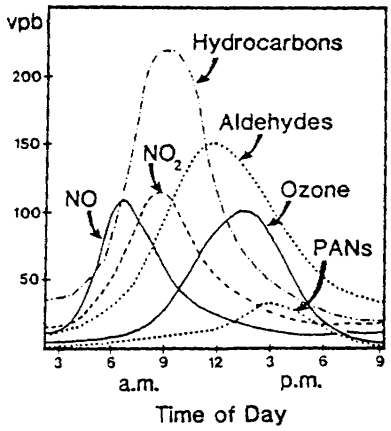
verkeersintensiteit omstreeks 12.00 uur en een dip rond 3 uur 's nachts. Combinatie met de meteorologie levert op dat gemiddeld de concentraties van direct door het verkeer uitgeworpen verontreiniging in de ochtend hoger zullen zijn dan gedurende de rest van de dag, omdat de menglaag nog dun is en de windsnelheid nog op gang moet komen. Door de groei van de menglaag en transport van verontreiniging neemt de concentratie gedurende de dag af met een veel kleinere tweede piek aan het eind van de middag. Dit algemene beeld wordt geïllustreerd aan de uurgemiddelde concentraties van NO op het meetstation 544 (Amsterdam Bernhardplein) voor de periode 17-8-2005 tot 23-8-2005 van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit van het RIVM. Merk op dat de NO_2 concentratie door de noodzakelijke omzetting van NO naar NO_2 en ander verloop heeft evenals de ozonconcentratie, die nog verder na-ijlt bij de NO concentratie.



Figuur 2 Verloop van de concentraties van O_3, NO en NO_2 gemeten door het LML op het meetpunt 544 (Amsterdam Bernhardplein) van het RIVM. (17 aug-23 aug 2005).

De voorgaande beschrijving levert ook aanwijzingen op wanneer de hoogste atmosferische concentratie aan verontreiniging zullen optreden. Voor direct uitgeworpen verontreiniging (NO, NO_2, CO, koolwaterstoffen, roetdeeltjes) zullen de hoogste concentraties optreden onder uitwisselingsarme omstandigheden. Dat zijn mooie zomerse dagen met 's nachts sterke uitstraling door een heldere lucht en lage windsnelheid (overdag zeer onstabiel weer en in de nacht juist zeer stabiel) en winterse dagen met lage windsnelheid (zowel dag als nacht, omdat de instraling en dus menging overdag gering is). We hebben echter niet alleen met direct uitgeworpen verontreiniging te maken. Het NO (95 % van de NO_x emissie van verkeer is NO, de rest NO_2) kan vrij snel in de atmosfeer reageren met O_3 tot het schadelijker NO_2. Omdat ozon naast enig transport vanuit de

stratosfeer vooral wordt gevormd door fotochemische reacties is daar zonlicht voor nodig en zullen reacties vooral van de instraling en temperatuur afhangen. In Nederland betekent dat vooral vorming van secundaire componenten in voorjaar, zomer en herfst. De reactietijd speelt daarbij ook een rol. Dit wordt geïllustreerd door figuur 3, waarin het verloop van primaire concentraties aan verontreiniging (NO_x en koolwaterstoffen) en de daaruit ontstane reactieproducten (ozon, aldehyden, PAN) is weergegeven. Behalve voor NO_2 (omdat de reactie tussen ozon en NO tot NO_2 snel verloopt) spelen de chemische reacties direct langs de weg een bescheiden rol.

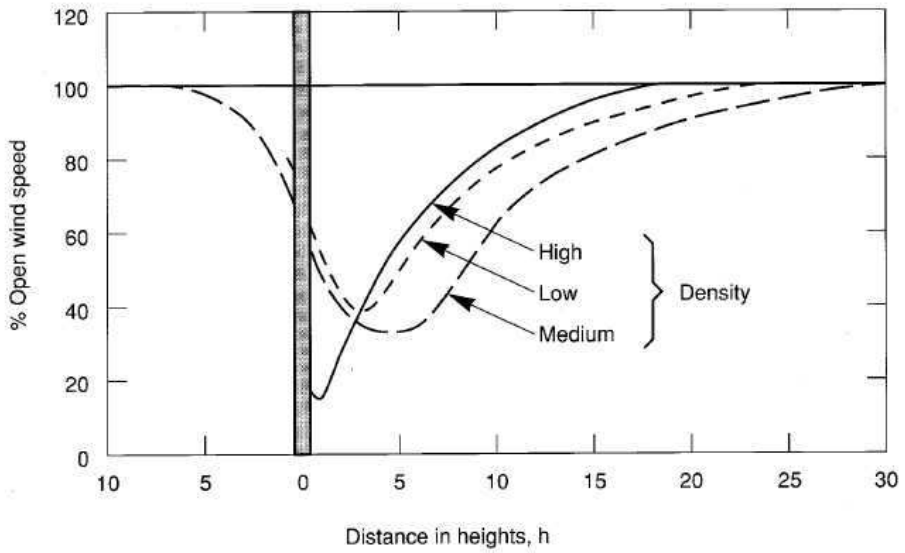


Figuur 3 Verloop van de verkeersgerelateerde concentraties aan primaire en secundaire verontreiniging als functie van de tijd t.g.v. chemische reacties.

3.1.4 Invloed van obstakels op de stroming en de concentratie

In paragraaf 3.1.1 is de stroming in een ongestoord stromingsveld gepresenteerd om het principe van verdunning met de afstand door verspreiding in de hoogte duidelijk te maken. In de praktijk is er zelden spraken van ongestoorde stroming en zeker niet in situaties met knelpunten in de luchtkwaliteit, waar bebouwing de weg dicht nadert. De obstakels (huizen, geluidsschermen) zullen de stroming beïnvloeden en de meteorologische situatie is daarop ook weer van invloed. In de wereld van geluidsmodellering en meting is dit een bekend feit. Afbuiging van geluid in de hoogte als gevolg van het windsnelheidsprofiel en temperatuurgradiënt en omlaag achter een scherm door de windsnelheidsgradiënt worden beschreven evenals verhoging van het geluidsniveau door reflectie tegen inversie lagen en omgekeerd afname van het niveau door sterke opwarming van de bodem (Heimann, 2003). Verstrooiing van geluid wordt door turbulentie versterkt, hoewel het effect niet groot wordt geacht (van Renterghem en Botteldooren (2002). Ondanks de invloed van de gelaagdheid van de atmosfeer, de stroming en turbulentie op het transport van geluid is de stroming rond schermen in de literatuur nauwelijks beschreven. Beschrijvingen zijn alleen te vinden in literatuur over modellering van geluidsbelasting, waarin de resultaten van berekeningen met stromings-modellen worden gepresenteerd (Heimann, 2003). In

het beste geval worden deze resultaten van de modellering getoetst aan metingen in een windtunnel (Salomons en Rasmussen, 2000, van Renterghem en Botteldooren,2003). Figuur 4 geeft een algemeen beeld van de stroming rond een verticaal scherm.



Figuur 4 Stromingspatroon rond een verticaal geluidsscherm. De windsnelheden zijn uitgezet als relatieve windsnelheden ten opzichte van de windsnelheid in het vrije veld (100%). Density dient te worden gelezen als porositeit.

Het algemene beeld is een remming van de windsnelheid voor het scherm, verhoging van de windsnelheid ter hoogte van de top van het scherm en afname van de windsnelheid met de hoogte tot het oorspronkelijke windsnelheidsprofiel. De invloedssfeer voor de stroomsnelheid strekt zich uit van omstreeks 3-5 keer de hoogte van het scherm voor het scherm tot omstreeks 10-20 keer de hoogte achter het scherm (Heimann, 2003), de invloed op de turbulentie intensiteit strekt zich verder uit (Jacobs, 1983). Het beeld uit figuur 4 is representatief voor een neutrale atmosfeer. Het stromingspatroon is afhankelijk van de atmosferische stabiliteit. Bij onstabiel weer (hoge instraling, lage windsnelheid) zal de invloedssfeer van het scherm geringer zijn en kan de zone van terugstroming (lijwervel) afwezig zijn. Bij stabiel weer hoort ook een lage windsnelheid en zal er geen lijwervel optreden. Conclusie is, dat de extra menging tengevolge van de door het scherm gegenereerde mechanische turbulentie onder stabiele en onstabiele omstandigheden gering zal zijn. Het effect op de stroming is het grootst onder neutrale condities.

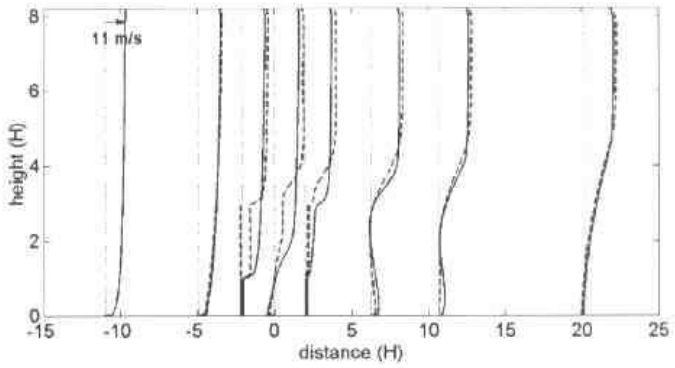
Het effect van meerdere schermen achter elkaar wordt wel voor geluid (Van Renterghem en Botteldooren, 2003, van Renterghem et al, 2002) maar niet voor de stroming in de literatuur beschreven. Verwacht mag worden, dat de windremming op hoogten onder de top van het scherm nog sterker is en de wind als het ware over de schermen wordt getild. De concentraties aan verontreiniging boven de weg zullen daarmee hoger oplopen. De eventuele lijwervel zal echter korter worden of niet ontstaan, omdat het drukverschil over de schermen bij meer

schermen afneemt. De invloed op de concentraties achter het scherm zou nader onderzocht moeten worden. Omdat de lucht met de hogere concentraties boven de weg, zich ook tot achter het scherm zal verplaatsen wordt verwacht dat de concentraties achter meer schermen hoger zullen worden dan in de situatie zonder scherm of met één scherm.

Omdat aan schermen geluidsreflectie optreedt wordt enerzijds gezocht naar oppervlakken, die zo weinig mogelijk reflecteren (Fujiwara et al, 1998) en anderzijds gekeken naar de vormgeving. Reflecties van geluid kunnen meer naar de bron toe worden gebogen door gebruik van concave schermen (vanuit het verkeer gezien hol) of meer naar boven worden afgebogen door convexe schermen. In alle gevallen is het de bedoeling om de geluidsbelasting als gevolg van reflectie op de tegenoverliggende wand te verminderen. Deze vormen hebben een geringe invloed op het stromingspatroon rond het scherm.(zie paragraaf 3.1.5)

De bovenzijde van een scherm vormt een plaats waar afbuiging van geluid richting receptor kan plaatsvinden. Deze afbuiging zal vooral een rol spelen bij een dun scherm. Wordt het scherm dikker of voorzien van een T-vormige top, dan zal het geluidsniveau achter het scherm dalen als gevolg van de verhoging door de top en de geometrie van de top (Defrance, 2003). Een dik scherm of scherm met top kan worden gezien als een zeer smal gebouw. Over de stroming rond gebouwen is meer informatie te vinden (Erbrink, 1995, Hosker, 1981, Huber, 1989, Olesen et al, 2000). Met behulp van deze literatuur kan bij benadering de concentratie aan verontreiniging achter een scherm worden geschat (van der Burg, 2004), gegeven een bepaalde bronsterkte en afwezigheid van belangrijke verliezen of reacties.

Tot nu toe is steeds sprake geweest van voor de wind ondoordringbare schermen. Poreuze schermen zijn ook mogelijk en kunnen ondanks die porositeit toch een reductie op get geluidsniveau bewerkstelligen. Van Renterghem et al, 2002, beschrijven gedeeltelijk poreuze schermen (25-45% porositeit) al dan niet in combinatie met aanvullende afscherming door vegetatie, waarbij schermen en vegetatie éénzijdig of tweezijdig aangebracht kunnen zijn en de vegetatie zich tot één of twee keer boven het scherm uitstrekt. Het scherm is een akoestisch hard scherm.
Zoals te verwachten is geven twee schermen ter weerszijden van de weg een hogere geluidsbelasting dan één scherm (door reflectie), wordt de effectiviteit minder bij hogere windsnelheden en heeft de vegetatie een extra vermindering van het geluidsniveau tot gevolg. De (in de windtunnel) gemeten windsnelheidsprofielen worden ook gegeven (zie figuur 5).



Figuur 5 Windsnelheidsprofielen in een windtunnel bij een windsnelheid boven in de grenslaag van 11 m s^{-1}. De afstanden zijn uitgedrukt in de hoogte (H) van het poreuze (32%) geluidsscherm. De gestippelde lijn geeft het profiel aan voor een tweezijdig geluidsscherm met een tweezijdige vegetatie, die tot 2H boven het scherm uitsteekt. De getrokken lijn geeft de situatie voor twee poreuze schermen en vegetatie aan één kant die tot een hoogte 2H boven het scherm uitsteekt. Het dun gestippelde lijntje geeft het constante profiel ter plekke van u = 0 m s^{-1}. Van Renterghem et al, 2002

3.1.5 Beïnvloeding van de stroming

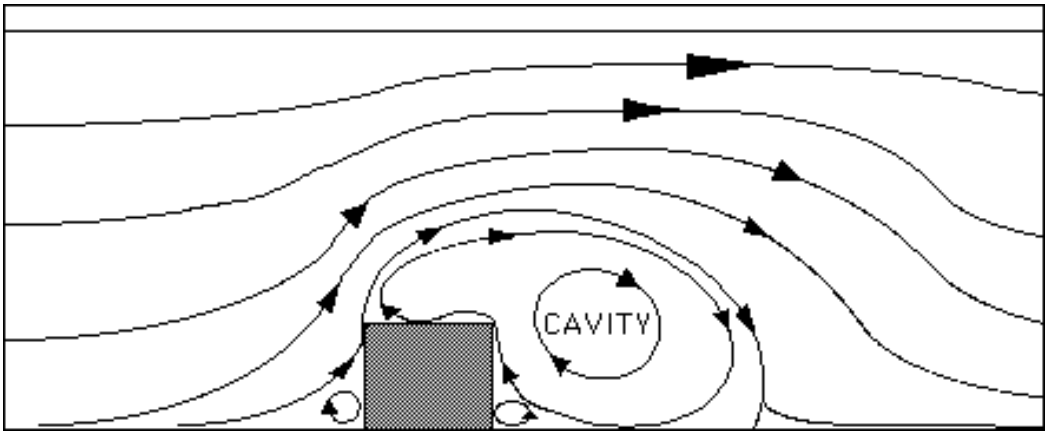
Uit de voorgaande paragrafen is naar voren gekomen, dat de stroming rond schermen de concentraties aan verontreiniging langs de weg zullen beïnvloeden en dat opmenging met lucht van grotere hoogte vooral voor verdunning van de verontreiniging moet zorgen. Deze stroming kan worden beïnvloed door;

- Het verkeer zelf
- De schermen (vorm en hoogte)
- Schermen in combinatie met vegetatie
- Toevoegen van additionele luchtstromen
- Topstukken op het scherm

Het verkeer zelf heeft invloed op de stroming door de voorwaartse component van de voertuigsnelheid en de extra turbulentie, die als gevolg van schuifkrachten wordt gegenereerd. Beide factoren zorgen voor verlaging van de concentratie boven de weg. Dit geldt met name voor vrachtverkeer, dat door de hoogte en het frontaal oppervlak invloed kan hebben tot meer dan 5 meter boven de weg. Wanneer de tegengestelde verkeersstromen niet gescheiden zijn door een (middenberm)scherm zal de snelheidscomponent in de lengterichting van de weg worden afgeremd door tegengestelde bewegingen. Door het grotere snelheidsverschil tussen luchtbeweging en voertuig zal de turbulentie wel toenemen. Er zijn in de literatuur geen aanwijzingen gevonden wat het netto effect is van de middenschermen op de luchtkwaliteit. Van tunnels is bekend, dat het verkeer en weer met name het vrachtverkeer een belangrijke component vormt in de ventilatie van de tunnel. Er kan met minder ventilatie worden volstaan indien de rijrichtingen in de tunnelbuizen gescheiden zijn (Buringh, 1980). Die scheiding is

overigens ook uit veiligheidsoverwegingen aanbevelenswaardig. Overkapping van wegdekken kan een oplossing bieden voor de plaatselijke blootstelling aan verontreiniging, doordat de emissies in de tunnel worden gevangen en slechts bij de uitgang uittreden. De geconcentreerde vorm maakt ook eventuele luchtbehandeling mogelijk. De geluidsbelasting kan aan de tunnelopening door multiple reflectie wel hoger zijn dan van een open weg (Yamashita en Yamamoto, 1990), doch door gebruik van absorberende wanden en louvres bij de tunnelopening worden gereduceerd (Yamashita en Yamamoto, 1990).

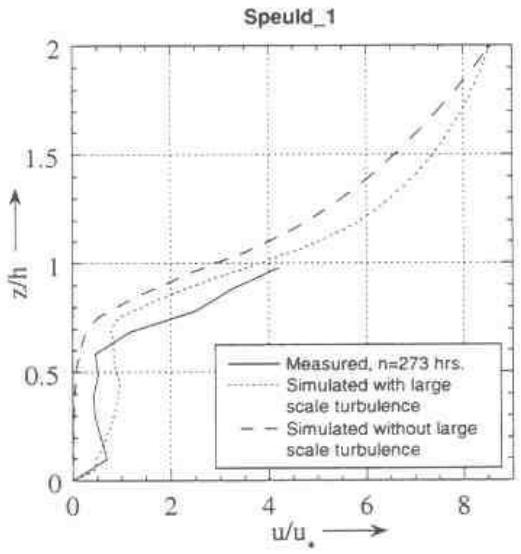
De invloed van schermen op de luchtstroming is reeds eerder ter sprake gekomen. Duidelijk is dat de vorm, hoogte en onderlinge afstand van de schermen een belangrijke rol spelen in de stroming rond de weg. De vorm (convex, concaaf of recht) en hellingshoek (loodrecht of schuin) speelt een geringe rol, omdat de verticale hoogte en de drukval over het scherm maar zeer beperkt worden beïnvloed. De stroming en inmenging van lucht uit hogere luchtlagen verandert daarbij weinig. De hoogte van het scherm zal naar verwachting wel belangrijke invloed hebben, omdat dit de stuwing van de lucht vanaf de weg verhoogt en door grotere wervels achter het scherm voor meer inmenging van boven lucht zorgt. Luifels zullen door windremming aanleiding geven tot sterk verhoogde concentraties boven de weg. Qua structuur is een luifel op te vatten als een oneindig lang gebouw met de emissies ter hoogte van het dak. Bij matig tot krachtige wind zal er een lijwervel ontstaan met verhoogde concentraties (zie figuur 6). Bij lage windsnelheid zijn de concentraties achter de luifel waarschijnlijk evenredig verhoogd met de concentraties voor de luifel boven de weg.



Figuur 6 Schematische weergave van de stroming in een lijwervel achter een gebouw in neutrale atmosfeer. Onder stabiele en onstabiele condities is de windsnelheid laag en ontstaat er geen lijwervel.

Vegetatie kan de rol van een scherm in de stroming beïnvloeden. In het werk van van Renterghem en Botteldooren, 2002) (zie vorige paragraaf) is dit aangetoond. Met name de zware

delen (stam, dikke takken) zorgen voor opname van impuls en daarmee verlaging van de windsnelheid. Dit wordt geïllustreerd door het bekende stromingspatroon in een bos (Li et al, 1985). In deze figuur is de windsnelheid genormaliseerd (dimensieloos gemaakt) door deze te delen door de wrijvingssnelheid. Het zelfde geldt voor de hoogte, waarbij de hoogte relatief is uitgezet ten opzichte van de hoogte van de kroon (h). De toppen van de bomen remmen de wind relatief weinig af (z/h=1). Daaronder vindt sterke remming plaats door het grote blad/naald oppervlak. Daaronder z/h = 0.1-0.2 zien we een secundair windmaximum in de stamruimte, omdat daar naar verhouding minder remming is (bij afwezigheid van ondergroei)(zie figuur 7). Deze figuur geeft aan, dat een goede opbouw van de vegetatie van belang is om het onderdoor waaien van verontreiniging te voorkomen.



Figuur 7 Genormaliseerde windprofielen (windsnelheid gedeeld door wrijvingssnelheid) in een Douglas bos met hoge naald dichtheid (LAI = 8-10). Z is hier de hoogte en h de hoogte van het kronendak.

Het toevoegen van additionele luchtstromen lijkt een interessante optie om de stroming en eigenlijk menging van de lucht boven de weg te beïnvloeden. In het ontwikkelatelier van het Innovatie Programma Luchtkwaliteit van 6 juli, 2005 werden de volgende suggesties gedaan;

- Stel windmolens op langs de snelwegen
- Breng ventilatoren aan in het scherm.

In een latere fase werd daar nog het idee van een luchtscherm aan toegevoegd.

Windmolens

Aan het stromingspatroon rond windmolens is veel onderzoek gedaan (in Nederland door ECN en verder o.a. in Denemarken en Californië). Zonder op deze gegevens in te gaan kan kwalitatief wat over deze oplossing worden gezegd. In verband met het windsnelheidsprofiel in de hoogte

van de atmosfeer worden hoge ashoogten gekozen (60-80 m voor grote windmolens). De wieken worden zo ontworpen, dat zij zo mogelijk een ideale schroef draaien in de doorstromende lucht. Er is dan geen sprake van slip en geen beïnvloeding van de stroming. Door stroom (= energie) te generen wordt de weerstand tegen draaiing verhoogd en treedt slip op met bijbehorende turbulentie. Die generatie van turbulentie vindt achter de wieken plaats en zal het sterkst zijn waar de meeste energie wordt opgenomen. Dat is boven de as in verband met de hogere windsnelheden aldaar. Om geen te grote wisselbelastingen op de wieken te krijgen moeten die niet "te laag" steken. De generatie van turbulentie dicht bij de grond (= bij de weg) is bezien vanuit de afmetingen van een windmolen gering. Bovendien constateerden we reeds, dat de grootste problemen ten aanzien van de luchtkwaliteit optreden bij windstil weer. Dit geeft aan dat de windmolen optie weinig kans geeft op succes. Natuurlijk zou de generator misschien ook als motor gebruikt kunnen worden om door elektriciteitstoevoer een luchtstroom dwars op de weg in stand te houden. Blijft de situatie dat deze luchtstroom zich niet op een adequaat niveau boven de weg bevindt.
Horizontale windmolens kunnen lager worden geplaatst. Wat over generatie van turbulentie door grote verticale windmolens is gezegd geldt in grote lijnen ook voor horizontale windmolens. De effectiviteit wordt als gering ingeschat, doch zal groter zijn dan voor de verticale windmolens. Deze inschatting wordt ondersteund door een TNO studie (Visser en Westrate,2005) met 0.5-1.5% verlaging van de concentratie.

Ventilatoren

Ventilatoren kunnen worden aangebracht op een niveau, dat relevant is voor de stroming en verdunning van verontreiniging rond de weg. Uitgangspunt is dat zaken als veiligheid, energiegebruik, eigen geluid productie en doorbreking van het scherm als geluidsbarrière geen rol spelen. Uitgangspunt is verder, dat gezien de kosten alleen eenvoudige axiaal ventilatoren zullen worden gebruikt. Kenmerk van deze ventilatoren is dat zij slechts geringe drukvallen kunnen overwinnen en het debiet snel terug loopt indien de drukval over de ventilator toeneemt. De ventilatoren kunnen derhalve alleen worden gebruikt in windstille omstandigheden. Dat zijn overigens relevante omstandigheden qua luchtkwaliteit. Gaan we uit van beperkte verspreiding van verontreiniging tegen de wind in (door turbulente menging), dan is het alleen zinvol aan de benedenwindse kant van de weg ventilatoren te gebruiken. In principe zijn drie configuraties mogelijk: blazen richting weg, blazen van de weg af, omhoog blazen.
Blazen richting de weg zal weinig effect hebben, omdat de statische druk juist tegengesteld is en de opbrengst van de ventilatoren daardoor gering is. De invloed van de ventilatoren neemt ook snel af met toenemende afstand tot de ventilator. Het effect zal naar verwachting niet veel afwijken van een dicht scherm. Wordt met de wind mee geblazen (dus richting woonwijk), dan vindt versterking van de stroming plaats en is de verlaging van de concentratie in principe mogelijk. Voor het scherm is echter een grote hoeveelheid goed gemengde verontreinigde lucht aanwezig, die nu gedeeltelijk door het scherm zal gaan en er gedeeltelijk overheen gaat. De menging met lucht van boven zal door de gedeeltelijke doorstroming van het scherm afnemen en

het is daarom niet duidelijk of er in dit geval wel een nuttig effect zal zijn. Omhoog gerichte ventilatoren vormen de best optie, omdat deze de menging van lucht van hogere niveaus bevorderen. Wanneer de ventilatoren daarbij lucht van achter het scherm aantrekken, schoner dan van voor het scherm, zal de werking door zowel verdunning als meer menging het meest effectief zijn.

Luchtschermen
Luchtschermen zijn een bijzondere vorm van ventilatoren. Ook hier is een verticale opstelling boven op een scherm en aanzuiging van lucht van achter het scherm het meest effectief. Omdat voor een luchtscherm meer impuls van de lucht nodig is wordt gebruik gemaakt van radiaal ventilatoren, die een grotere drukval kunnen overwinnen dan axiaalventilatoren maar ook meer energie zullen gebruiken en meer geluid zullen produceren. Evenals bij de axiaalventilatoren is het gebruik alleen onder bepaalde atmosferische omstandigheden nodig.
In beide gevallen(ventilatoren en luchtscherm) is kwantificering van de effectiviteit van deze beïnvloeding van stroming en menging nodig (TNO, 2005).

3.2 Vorming en verdwijning van verontreiniging

3.2.1 Droge depositie van fijn stof en NO_x
In de voorgaande paragraaf was sprake van stroming en transport en verdunning door menging met schonere lucht. Verdunning is echter niet het enige mechanisme dat een rol speelt in de verlaging van concentraties. Stoffen kunnen ook onderhevig zijn aan droge depositie, natte depositie en chemische omzetting.
Voor de droge depositie geldt, dat de depositiesnelheid (effectieve snelheid waarmee de verontreiniging uit de lucht verdwijnt) afhankelijk is van een aërodynamische weerstand R_a, die van de atmosferische stabiliteit afhankelijk is, een grenslaag weerstand, die afhangt van de stof maar gering is en groter wordt als de grenslaag groeit door lage luchtsnelheden of grotere ruwheid van het oppervlak en ten slotte de oppervlakte weerstand. Meestal is de oppervlakteweerstand de grootste weerstand, behalve voor sterk oplosbare stoffen als ammoniak en vrije zuren. De vochttoestand van het oppervlak speelt daarbij een rol. Voor deeltjes spelen bovendien zaken als impactie en sedimentatie een rol, die afhangen van de deeltjesgrootte. Voor een diepgaander beschrijving van deze materie wordt verwezen naar het dictaat Air Quality (Slanina, 2004) en de practicum handleiding Air Quality (Hofschreuder et al, 2004)
Om een idee te geven van oppervlakteweerstanden en depositiesnelheden zijn in tabel 1 de oppervlakten weerstanden voor een aantal stoffen weergegeven, zoals gebruikt in het OPS model (van Jaarsveld, 1995) en afgeleide depositiesnelheden voor een gecombineerde aërodynamische- plus grenslaag weerstand van 20 s m^{-1}.

Tabel 1 Oppervlakteweerstanden (R_c) voor droge depositie van een aantal stoffen ontleend aan het OPS Model (van Jaarsveld, 2004) en de daaruit afgeleide depositiesnelheid voor een gemiddelde atmosferische transportweerstand ($R_a + R_b$) van 20 s m^{-1}.

component	SO_2	NO_x	NH_3	HCl	benzeen	aërosol
R_c (s m^{-1})	60	600	30	13	9999	0
v_d (m s^{-1})	0.013	0.002	0.020	0.030	9.98E-5	0.050

De gegevens uit tabel 1 leiden tot een aantal belangrijke conclusies;

- Zelfs voor componenten met een oppervlakte weerstand van nul (aërosol) is de droge depositieflux richting een oppervlak (F_{dd} (μg m^{-2} s^{-1})= C (μg m^{-3}) x v_d (m s^{-1}) in de orde van procenten van de horizontale flux van verontreiniging als gevolg van transport door de wind F_t = C x u (m s^{-1}), omdat de windsnelheid meestal in de orde van meters per seconde is en de depositie in de orde van centimeters per seconde.
- Voor wateroplosbare stoffen als SO_2, NH_3 en HCl is de aangegeven weerstand een gemiddelde, dat rekening houdt met de periode dat het oppervlak nat is en de weerstand die tegen transport gaat optreden door het verzadigd raken van de oplossing, en de mogelijkheid dat stoffen de depositie van elkaar versterken door neutralisatie (NH_3 en SO_2). Het nat houden en verversen van vocht op oppervlakken kan de droge depositie versterken doch uit de tabel is af te leiden, dat het effect voor oplosbare stoffen een factor 2-4 bedraagt. Het effect op de totale horizontale flux blijft daarmee gering.
- Hetzelfde als voor wateroplosbare stoffen geldt voor wegreagerende stoffen (NO_x aan TiO_2 gecoat oppervlak). De verontreiniging moet immers eerst door atmosferisch transport het oppervlak bereiken, pas daarna bepaalt de oppervlakteweerstand hoeveel er per tijdseenheid omgezet kan worden.
- De opgeven depositiesnelheid voor NO_x geldt in feite voor NO_2. De depositiesnelheid voor NO is zeer gering. NO dient eerst tot andere stoffen te reageren (NO_2 en HNO_2 en HNO_3) voor het uit de atmosfeer verdwijnt.

De voorgaande theorie geldt voor de depositie op een plat oppervlak. Meer winst dan met het nat houden van oppervlakken is te behalen door het oppervlak te vergroten. Een groenstrook heeft al snel een oppervlak aan blad per vierkante meter grondoppervlak van 6 m^2 of meer. Als we aannemen dat de droge depositie op dit oppervlak recht evenredig is met het oppervlak (de depositieflux is immers gering ten opzichte van de doorgevoerde hoeveelheid materiaal), dan kan de reiniging door droge depositie al snel een factor 4-8 toenemen. Voor fijn aërosol mogen we het effectieve oppervlak verdubbelen, omdat depositie plaats vindt door diffusie naar het oppervlak en dit zowel voor de bovenzijde als voor de onderzijde van het blad geldt. Voor grof aërosol (> 2,5 μm) is vegetatie door zijn structuur van takken bladranden ed. tengevolge van impactie van het aërosol effectief. De windremming in de vegetatie zorgt er verder voor, dat meer lucht omhoog wordt gestuwd, zodat ook de menging met (schonere) bovenlucht toeneemt.

Deze oppervlakte vergroting zou ook kunstmatig kunnen worden aangebracht. Optimalisatie voor de luchtkwaliteit en geluid zou daarbij aandacht moeten krijgen.

Tenslotte dient er aandacht te zijn voor de bindende krachten. Het gedeponeerde materiaal zal in het algemeen worden vastgelegd door chemische reacties aan het oppervlak, opname door actieve elementen als huidmondjes van planten, oplossen in water, oppervlakte ruwheidselementen (haren etc.) die er voor zorgen dat bijvoorbeeld gedeponeerd aërosol niet weer los komt en elektrostatische krachten.

3.2.2 Natte depositie

Naast droge depositie kan er sprake zijn van natte depositie. In dat geval vormen hydrometeoren (regendruppels, sneeuwvlokken, hagel) het medium dat voor depositie zorgt. Binnen de natte depositie kunnen twee processen worden onderscheiden; uitregenen en uitwassen. Uitregenen houdt in, dat we te maken hebben met door waterdamp oververzadigde lucht. De waterdamp condenseert op aërosolen en gasmoleculen (in afhankelijkheid van grootte, oplosbare fractie en eventuele kristalstructuur (ijsvorming)). Opwaartse luchtstromingen, vallende druppels en foretische krachten zorgen voor invang van gassen en deeltjes door de druppels of ijs-sneeuwkristallen (Pruppacher en Klett, 1998) Door groei van de druppels of ijsdeeltjes kunnen de hydrometeoren met de opgeloste stoffen uitregenen. Dit proces is belangrijk in het reinigen van de lucht (vooral van kleine deeltjes (0.1-1.0 μm)). De aard van het proces verraad, dat dit vooral optreedt op de hoogte in de atmosfeer waar wolkvorming optreedt. In het algemeen zal dit proces geen rol spelen op korte afstanden tot een weg.
Het tweede proces is het uitwassen. De verontreiniging wordt in de neerdalende regendruppeltjes opgenomen. Omdat de lucht om een vallende druppel heen stroomt (inclusief verontreinigende gassen en kleine deeltjes is dit mechanisme weinig effectief. Verwijderingspercentages worden geschat op 0.1-10% procent per seconde (McMahon en Denison,1979). De verwijderings-snelheid is afhankelijk van de deeltjesgrootte, de druppelgrootte en de regenintensiteit. Voor grof aërosol, zoals dat van de weg kan komen (losraken van materiaal uit de uitlaat en resuspensie van materiaal dat reeds op de weg is afgezet is dit mechanisme effectiever dan voor fijn aërosol, dat direct vanuit de uitlaat wordt verspreid. In zijn totaliteit wordt voor Nederland voor oplosbare stoffen de natte depositie op omstreeks 30% van de droge depositie geschat (Heij en Schneider, 1994). Het uitwasproces draagt 10-15% bij aan deze natte depositie (Slanina, 2004). De natte depositie van emissies van de weg wordt daarmee in de directe omgeving van de weg van geringe betekenis (minder dan 3-4% omdat de dikte van de laag waar de druppels door de pluim van de wegemissies heen vallen gering is). NOx is weinig oplosbaar en wordt om die reden met een nog geringere percentage uitgewassen.

3.2.3 Chemische reacties

Chemische reacties kunnen voor verdwijnen van verontreiniging zorgen. Het is niet altijd gezegd, dat de stoffen die worden gevormd minder schadelijk zijn dan de oorspronkelijke stoffen. Reacties kunnen plaatsvinden onder invloed van zuurstof in de lucht en waterdamp en zijn dan relatief constant in de tijd (er is wel temperatuur afhankelijkheid). Minder reactieve stoffen kunnen met name worden geoxideerd door OH radicalen in de lucht, die onder invloed van zonlicht worden gevormd. De reactiesnelheid hangt dan af van de stralingsintensiteit van de zon. Beide vormen van reacties zijn in het algemeen te langzaam om van belang te zijn op korte afstand van een weg (de omzettingssnelheden liggen in de orde van grootte van enkele procenten per uur, behalve ammoniak dat tot omstreeks 10% per uur komt).
De enige snelle reactie, die langs de weg een rol speelt is de reactie van NO (95% van de NO_x emissie is NO) met ozon tot NO_2 en O_2. Langs de weg is geen sprake van fotostationair evenwicht (evenwicht tussen de vorming van NO_2 uit NO en O_3 en de afbraak van NO_2 onder invloed van zonlicht). De inmenging van ozonhoudende lucht van grotere hoogten bepaalt hoeveel NO_2 er wordt gevormd en hoeveel ozon er wordt afgebroken. De schadelijke werking van ozon op mens en plant is aangetoond (Heij en Schneider, 1994). Op basis van EU normstelling voor NO_2 kan ook worden verwacht, dat er schade door NO_2 aan vegetatie mogelijk is. Epidemiologisch en toxicologisch onderzoek geeft echter aan dat niet zozeer NO_2 schadelijk is voor de mens als wel dat NO_2 model staat voor het complex aan verkeer gerelateerde emissies, die in gezamenlijkheid een negatief effect hebben op de mens (Brunekreef en Holgate, 2002). Hoewel de normstelling voor NO_2 noopt tot aandacht voor deze component is het op grond van de constantheid van de hoeveelheid oxidant ($NO_2 + O_3$ (in mol) = constant), de vraag of deze reactie veel aandacht behoeft.
Een tweede belangrijke reactie is de vorming van HNO_3 uit $N_2O_5 + H_2O + h\nu$. Het N_2O_5 bouwt in concentratie op gedurende de nacht en valt in de ochtend onder invloed van zonlicht en waterdamp uiteen. HNO_3 is als gas zeker schadelijk, doch de vorming is niet afhankelijk van de nabijheid van de weg. De verkeersemissies als totaliteit vormen een belangrijke bron voor het ontstaan van N_2O_5.
Bestanddelen van aërosolen kunnen ook worden omgezet tot andere stoffen. Deze reacties zullen in het algemeen slechts langzaam verlopen, zodat het belang voor situaties vlak langs wegen gering is. Conclusie is, dat alleen de omzetting van NO tot NO_2 en daarbij de afbraak van ozon langs de weg van belang is.

3.2.4 Verhoging van de contactmogelijkheden en vergroting van het vangend oppervlak met passieve constructies

In paragraaf 3.2.1 werd aangegeven, dat de droge depositie van gassen en aërosol kan worden verhoogd door het oppervlak te vergroten. Deze oppervlaktevergroting kan zowel door toepassing van vegetatie (zie paragraaf 3.2.5) als door toepassing van passieve constructies plaatsvinden. Technisch gezien zijn de mogelijkheden van vergroting van het oppervlak beperkt. Weliswaar kunnen allerleis soorten ribbels op schermen worden aangebracht, doch de

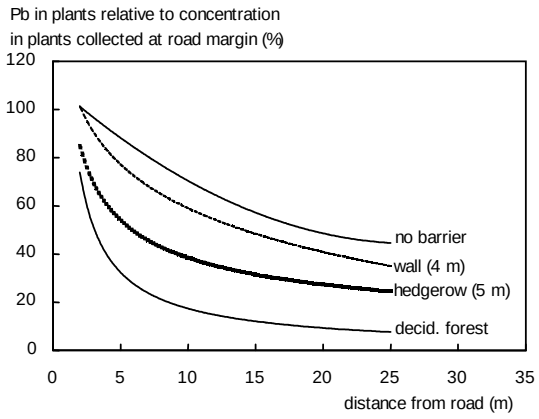
oppervlaktevergroting daarvan is beperkt. Het feit blijft, dat een groot deel van de lucht over het scherm heen wordt gestuwd zonder contact te hebben met het scherm. Doorstroming zou effectiever zijn, maar inhouden, dat constructies (gaas o.i.d.) voor het scherm moeten worden aangebracht. Een mogelijkheid zou kunnen zijn om één of meer gaasrekken voor een geluidsscherm te plaatsen en deze met klimplanten te laten begroeien. Het scherm is op deze wijze doorlatend en heeft een groot oppervlak, terwijl het achterliggende vaste scherm de functie als geluidswering behoudt.

3.2.5 Opname van luchtverontreiniging door groene geluidsschermen

Klim- en leiplanten worden langs geluidsschermen aangeplant om deze te vergroenen. Voor klimplanten zoals klimop (*Hedera helix*) dient het scherm hierbij veelal als houvast. Er zijn ook groene geluidsschermen in de markt waarbij het geluidsscherm zelf dienst doet als grondsubstraat voor plantengroei. De keuze van plantensoorten kan in veel situaties optimaal worden afgestemd op standplaats en omgeving.

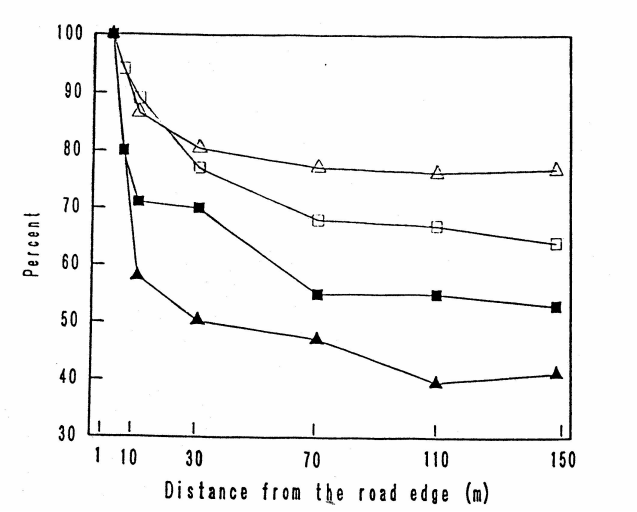
Planten kunnen alle verkeersgerelateerde componenten (CO, NOx, VOS, PM10) opnemen en daarmee deels uit de lucht verwijderen. Vegetaties kunnen worden beschouwd als een belangrijke 'sink' voor luchtverontreiniging. De effecten van groenelementen op het concentratieverloop rond wegen en de mogelijkheden om groenelementen in te zetten ter verlaging van de concentraties zijn nog zeer beperkt onderzocht. Dit geldt ook voor de effectiviteit van groene geluidsschermen.

Voorbeelden van onderzoek die duiden op een verlaging van de concentraties langs wegen in de aanwezigheid van groen, worden gepresenteerd in de figuren 8 en 9. In Figuur 8 wordt de invloed van verschillende typen barrières op de verspreiding en depositie van deeltjes rond een snelweg onderstreept aan de hand van metingen van loodconcentraties in de vegetatie. De loodconcentratie als maat voor de verspreiding van stofdeeltjes neemt onder alle omstandigheden af met toenemende afstand tot de weg. De snelheid van afname in aanwezigheid van hagen en bomen is vooral in de eerste 10 tot 15 meter van de weg veel groter dan die in open terrein en ook groter dan die in aanwezigheid van een 4 meter hoog geluidsscherm. Op 25 meter afstand van de snelweg bedraagt de loodconcentratie in planten in afwezigheid van een barrière ongeveer 45% van die in planten dicht bij de snelweg. In aanwezigheid van hagen en loofbos is dit gedaald tot ongeveer 20% respectievelijk 5%.



Figuur 8. Effecten van verschillende typen barrières ('no barriers', geen barrière; 'wall', geluidsscherm; 'hedgerows', hagen; deciduous forest, loofbos) op de concentratie van lood in planten op verschillende afstanden ten opzichte van dat in planten direct langs snelwegen in Baden-Württemberg (naar gegevens van Schweikle, 1999).

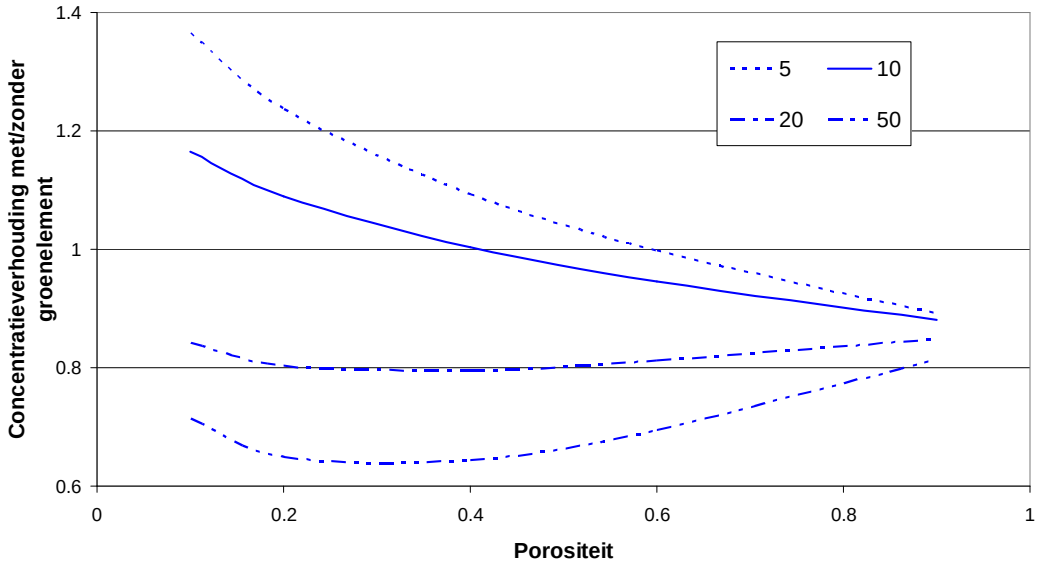
Nasrullah et al. (1994) bestudeerden het effect van beplanting langs snelwegen op de verspreiding van NO_2 (Figuur 9). Beplantingen met bomen van maximaal circa 15 meter hoogte op het niveau van de weg reduceerden de NO_2 concentratie in belangrijke mate tot op een afstand van 150 meter. Afhankelijk van de afstand tot de weg was deze afname maximaal 17%. De afname in concentratie met toenemende afstand tot de weg was in aanwezigheid van beplanting gemiddeld circa 12% groter dan die in open terrein.
De processen die verantwoordelijk waren voor de geconstateerde afname in concentratie en de rol van de beplanting hierbij, zijn verdunning door extra inmenging van achtergrondslucht en depositie op de vegetatie. De afzonderlijke bijdragen van deze processen is in bovenbeschreven voorbeelden niet onderzocht. Het contact tussen verontreiniging en bladeren is essentieel voor de filterende werking van planten. Beplanting vangt verontreiniging af door middel van verticale depositie wanneer lucht over de beplanting heen wordt geleid. Beter zou het zijn om de lucht met daarin de verontreiniging door de beplanting heen te leiden. De doordringbaarheid van beplanting waarvoor de optische porositeit als maat wordt gehanteerd, moet dan wel voldoende groot zijn.



Figuur 9. Afname in concentratie van NO_2 door beplanting op verschillende afstanden van de rand van een verkeersweg (Nasrullah et al., 1994).
■ *beplanting op winderige dagen;* ▲ *beplanting bij kalm weer;*
□ *open terrein op winderige dagen;* Δ *open terrein bij kalm weer.*

Wesseling et al. (2004) hebben schattingen gemaakt van de invloed van poreuze groenelementen op de concentraties van NO_2 en PM10. Afhankelijk van de situatie vangen groenelementen bij gemiddelde meteorologische omstandigheden maximaal 15-20% van het aanbod aan PM10 af. Voor NO_2 is dit percentage maximaal 10%. Terwijl groenelementen dichtbij de weg (dit is de emissiebron) verontreiniging opnemen, dempen deze elementen ook de windsnelheid waardoor de uitlaatgassen met minder lucht worden gemengd en dus in concentratie toenemen. Het netto resultaat van de positieve en negatieve effecten van groenelementen op de concentratie dichtbij de bron is afhankelijk van de optische porositeit van het groenelement en de grootte van de stofdeeltjes (Figuur 10).

Voor concentratieverhoudingen kleiner dan 1.0 is de netto concentratie met groenelement lager dan de concentratie zonder groenelement. Bij lagere porositeiten is er naar verwachting voor zowel PM10 als voor PM5 een globaal negatief effect, de concentraties worden hoger. Dit laat onverlet dat het groenelement uiteraard nog steeds deeltjes vangt. Alleen is het effect van de snelheidsdemping groter dan het effect van de deeltjesvangst. Bij hogere porositeiten (>50%) is het netto effect van het groenelement op de concentraties positief. Voor stofdeeltjes met een diameter van 20 μm en groter resulteert een groenelement dichtbij de weg altijd in een verlaging van de concentratie kort achter dit element. Op 100 tot 150 meter van de weg is het verkeersgerelateerde fijn stof volledig gemengd met de lucht. Het dempende effect van een groenelement op de windsnelheid speelt dan geen rol meer en een groenelement leidt dan altijd tot een verlaging van de concentratie.



Figuur 10. Effect van een groenelement op de concentratie kort achter dit element als functie van de optische porositeit en de deeltjesgrootte (Wesseling et al., 2004). De concentratie is weergegeven als relatieve maat ten opzichte van de concentratie vlak naast de weg zonder scherm. *5, 10, 20 en 50 refereren aan achtereenvolgens PM5, PM10, PM20 en PM50.*

Zonder rekening te houden met het effect van de windsnelheidsdemping op de concentratie dichtbij de weg kunnen groenelementen de concentratie van NO_2 met maximaal 10% reduceren (Wesseling et al., 2004). Het belang van groenelementen dichtbij wegen is vooral gelegen in een zuivering van de lucht in een omgeving waarin de concentraties hoog zijn. Afhankelijk van de hoeveelheid verontreiniging die de aanwezige beplanting opneemt, kunnen de concentraties benedenwinds meer of minder zijn verlaagd. Voor een effectieve verlaging van de concentraties is het in ieder geval opportuun om bomen aan te planten bij de rand van de bebouwing op circa 100 tot 150 meter van de verkeersweg. In dergelijke situaties leidt het filterende effect van groenelementen altijd tot verlaging van de concentraties.

De effectiviteit van de opname van luchtverontreiniging door beplanting is afhankelijk van vele factoren (Tonneijck en Blom-Zandstra, 2002; Wesseling et al, 2004). Kennis over deze factoren levert aanknopingspunten voor de formulering van richtlijnen die kunnen worden gehanteerd bij een meer gericht ontwerp van groene geluidsschermen in functie van de luchtkwaliteit. De belangrijke factoren betreffen:

1. Plantensoort
   - Wijze van opname van een bepaalde component
   - Vorm en oppervlakte van bladeren

- Al of niet groenblijvend
- Takstructuur

2. Structuur van vegetatie
   - Breedte en hoogte
   - Optische porositeit
   - Ruwheid

3. Blootstelling
   - Aard van de luchtverontreinigingscomponent
   - Blootstellingsniveau

4. Locatie
   - Afstand tot de bron van emissie (de weg)
   - Aanwezigheid van bebouwing

5. Omstandigheden
   - Groeiomstandigheden
   - Hoek waaronder groenelement wordt aangestroomd
   - Microklimaat

Geluidsschermen met klim- of leiplanten vormen een ondoorlaatbaar obstakel voor de lucht en het contact tussen verontreiniging en plant is niet optimaal.
De bladeren nemen via verschillende processen luchtverontreiniging op en vergroten als zodanig het totaaloppervlak van een geluidsscherm dat voor het afvangen beschikbaar is. Ten opzichte van geluidsschermen zonder begroeiing vergroten planten ook de ruwheid van het schermoppervlak. Beide factoren resulteren in een vergrote opname van verontreiniging. Onderzoek aan klimplanten in steden heeft aangetoond dat deze planten goed in staat zijn stof afkomstig van verkeer te accumuleren en dat bepaalde plantensoorten hierbij effectiever zijn dan andere. De accumulatie is onderin de plant het grootst en neemt af met de hoogte van de begroeiing (Thönnessen, 2005). Opvallend is dat op 5 tot 7 meter boven het grondoppervlak steeds een tweede opnamemaximum kan worden aangetoond mogelijk als gevolg van turbulentie. De mate waarin klimplanten zoals *Parthenocissus quinquefoli*a (1.6-4 m^2 blad/m^2 muur), *P. tricuspidata* (2.0-8.0 m^2 blad/m^2 muur) en *Hedera helix* (2.6-7.7 m^2 blad/m^2 muur) fijn stof afvangen is positief gecorreleerd met het bladoppervlak. Zo kan *P. tricuspidata* tot 4 gram fijn stof per vierkante meter muuroppervlak opnemen en *Hedera helix* 6 gram per vierkante meter (uit Dunnett en Kingsbury, 2004).

3.2.6 Vernevelen van water

Het uitwassen van aërosol door regen blijkt voor aërosolen weinig effectief (zie paragraaf 3.2.2).

Voor weinig oplosbare gassen als NO en NO_2 zal het proces nog minder van belang zijn. Een vraag is echter hoeveel effectiever we zouden kunnen zijn dan een regenbui om aërosol te verwijderen. Een bovengrens kan worden gevormd door de effectiviteit van luchtwassers als maatstaf te nemen. De effectiviteit van een experimentele luchtwasser varieert tussen 44-97% (Aarnink et al, 2004). Deze effectiviteit verschilt weinig voor respirabel stof (< 2.5 μm), thoracaal stof (< 10 μm) en inhaleerbaar stof. In de praktijk langs een weg zal het resultaat erg sterk afhangen van de windsnelheid over het scherm, de volumeconcentratie aan druppeltjes, die kan worden bereikt en het effectief volume, waarin het wasproces plaats vindt. Mogelijk is combinatie met ventilatoren en/of een luchtscherm een experiment waard.
Aarnink en van der Hoek, (2004) hebben in stallen gekeken naar het effect van sproeien van water en bevochtiging van de bodem op de stofemissie. De stof reductie was in dit geval 50%. Wanneer olie werd gebruikt was het rendement 90%. Het verschil wordt toegeschreven aan het verdampen van het water op de bodem, waardoor deze droog wordt en weer resuspensie van aërosol kan optreden. Een voorzichtige conclusie richting toepassing van verneveling bij en weg zou kunnen zijn, dat resuspensie niet kan worden voorkomen en een nat wegdek i.v.m. slipgevaar ook niet wenselijk is, tenzij de waternevel zich tussen de weg en het scherm bevindt. Het aërosol houdende water kan dan via goten worden afgevoerd. De bestemming van dit vervuilde spoelwater is dan het volgende probleem. De efficiëntie stofvangst door van verneveling van water zal dan lager zijn dan 50%, omdat de verblijftijd van de stofhoudende lucht in de nevel geringer zal zijn en mogelijk ook geringere druppelconcentraties kunnen worden bereikt. Bedacht moet worden, dat de luchtkolom, die verrijkt is met verkeersaërosol en over het scherm stroomt flinke verticale afmetingen heeft (zie paragraaf 3.1.2). Nemen we aan, dat de nevel tot omstreeks 1 m boven het scherm komt en de druppel aantallen door verwaaien en snelle depositie ongeveer de helft zijn van die in gecontroleerde gaswassers, dan wordt het rendement geschat op 1/5*0.5*90%= 9%. Daarbij moet uitdrukkelijk worden gesteld, dat dit een zeer rudimentaire schatting is.

3.2.7 Elektrostatische precipitatie

Elektrostatische precipitatie kan worden onderscheiden in actieve en passieve neerlag van aërosol. Bij passieve precipitatie wordt gebruik gemaakt van kunststof filtermateriaal, waarbij dit materiaal door langsstroming van de lucht of dopen in een vloeistof lading krijgt (Kanaoka en Ishiguro, 1984). Belading van de passieve filters zorgt wel voor een afname van de filterefficiëntie in de tijd (Moyer en Bergman, 2000). Bij actieve elektrostatische precipitatie wordt het aërosol tussen geladen elektroden door gestuurd. Dit principe wordt ook toegepast in industriële afgasreiniging. De benodigde spanning bedraagt in dit geval een tiental kiloVolts en is afhankelijk van de elektrodenafstand. Een tussenvorm vormt een filter met ondersteuning van een elektrisch veld (Vincent, 1986). Het elektrisch veld zorgt voor lading van het aërosol en verhoogt de efficiëntie van het filter. Voor kunstmatig geladen filters (ook wel electreet filters genoemd) is er echter een afname van filterefficiëntie door neutralisatie van lading op het filter (Vincent, 1986).

De efficiëntie van beide typen elektrostatische filters kan hoog zijn (>95%). Er zijn echter ook wat nadelen te noemen;

- De passieve filters hebben een zekere drukval, waardoor in principe pompen nodig zijn.
- De actieve filters vergen een scherm, waar de lucht doorheen kan stromen en wat het scherm voor geluidsreductie minder geschikt maakt. Bovendien zijn hoge spanningen nodig, die een veiligheidsrisico kunnen inhouden voor de op de grond levende mensen en dieren.

In principe zou de optimalisatie van een (optrekbaar) scherm overwogen kunnen worden, waarbij een evenwicht wordt gevonden tussen openstructuur, waardoor wind door het scherm kan blazen en drukval over het scherm als drijvende kracht voor de luchtbeweging door het scherm en de vangstefficiëntie, die afneemt bij toenemende openheid van het scherm. Over dit idee is geen literatuur gevonden.

3.2.8 Filtratie met filters

In de vorige paragraf is filtratie reeds ter sprake gekomen. Omdat voor gewone filters in feite hetzelfde geldt als voor de elektrostatische filters, maar dezelfde vangstefficiëntie alleen kan worden gehaald met een grotere drukval, zijn "gewone filters" geen optie. Wel dient te worden geconstateerd dat de prijs voor bijvoorbeeld glasvezelfilters aanzienlijk lager is dan voor elektrostatische filters.

4 Samenvatting van de theorie in de richting van oplossingen

In hoofdstuk 3 zijn een aantal theoretische beschouwingen over de verspreiding, depositie en chemische omzetting van verkeersemissies gegeven. Deze beschouwingen zijn zoveel mogelijk onderbouwd en doorgetrokken richting mogelijke oplossingen. Ten behoeve van het overzicht en mede ter voorbereiding op hoofdstuk 6 worden de conclusies hier puntsgewijs samengevat.

1. Vermindering van de blootstelling aan verkeersemissies kan plaatsvinden door vergroting van de verdunning van de emissies boven de weg en/of vergroting van de effectiviteit van mechanismen, die de verontreiniging afvangen.
2. Maatregelen kunnen worden onderscheiden in permanente (bouwkundige) maatregelen als aanleg van schermen, tunnels en beplanting of tijdelijke maatregelen tijdens episoden van verontreiniging, zoals verneveling, elektrostatische filtering of overkapping met een schuifdak.
3. De vormgeving van een scherm en eventuele schermtoppen ed zijn van weinig invloed op de stroming rond een scherm en heeft daarmee een geringe invloed op de achterliggende concentraties aan verontreiniging. Van verhoging van schermen mag door extra inmenging van lucht met achtergrond concentraties verlaging van de concentraties achter het scherm worden verwacht.
4. Hoge concentraties ontstaan in uitwisselingsarme atmosferische omstandigheden. Die treden op;
    a) Bij stabiele weersomstandigheden in de winter (zowel overdag als 's nachts)
    b) Bij onstabiele omstandigheden in de zomer, die meestal vooraf worden gegaan door een zeer stabiele nacht.
    c) In beide gevallen zal de piek in concentraties vooral in de ochtend optreden.
5. Verhoging van de opmenging van de lucht boven de weg met lucht van grotere hoogte is een effectief middel om de concentraties op leefniveau te verlagen. Het effect is mede afhankelijk van de reeds aanwezige achtergrond in de bovenlucht (stadsachtergrond). Het ontstaan van lijwervels kan worden voorkomen door het scherm poreus te maken. Poreuze schermen beschermen ook een groter achterliggend gebied. Verlaging van de blootstelling in het algemeen (niet alleen tijdens episoden) is gunstig, omdat er voor fijn stof geen no-effect level bestaat.
6. Bij alle maatregelen langs de weg dient te worden bedacht, dat de opmenging boven de weg door het verkeer zich in afhankelijkheid van verkeersintensiteit, percentage vrachtverkeer, breedte van de weg en atmosferische stabiliteit tot een hoogte van 5-10 meter uitstrekt. Dit dient een relatie te hebben met eventuele methoden voor extra afvangst van verontreiniging.
7. De droge depositie van NO langs de weg is laag, voor NO_2 matig en voor fijn stof groter (in de orde van 2-5%). De natte depositie is van gering belang op de optredende concentraties.

8. Punt 7 geeft een bovenwaarde aan voor katalytische omzettingen aan oppervlakken, omdat de componenten eerst het oppervlak moeten bereiken en het droge depositieproces van veel minder belang is dan het (horizontale) transportproces.
9. Droge depositie kan meer effectief gemaakt worden door gebruik van poreuze schermen (zodat er meer lucht langs het oppervlak stroomt) en vergroting van het natuurlijke (vegetatie) of kunstmatige oppervlak.
10. Van nature speelt de omzetting van NO onder invloed van ozon rond de weg een rol. De NO_2, die daarbij wordt gevormd telt op bij de reeds aanwezige achtergrond aan NO_2 en de verkeersbijdrage aan NO_2 (5% van de NO_x emissie).

Naast de natuurlijke processen rond de weg als stroming, menging depositie en chemische omzetting zijn enkele specifieke maatregelen bekeken, die potentieel voor uitvoering ter verbetering van de luchtkwaliteit in aanmerking komen;

1. Commerciële windmolens geplaatst langs snelwegen lijken geen reële optie, omdat hoogte en tijdstip van werking niet sporen met de hoogte waarop de verontreiniging zich bevindt en de tijdstippen waarop pieken in concentraties optreden. Lage windmolens met omkeerbare functie (luchtverplaatsing bij lage windsnelheid door de molen als ventilator te laten draaien) zou wellicht een optie kunnen zijn.
2. Op basis van verhoging van de transporthoogte van de vervuilde lucht boven de weg en stimulering van de menging zouden ventilatoren en luchtschermen gunstig kunnen werken, mits verticaal opgesteld. De effectiviteit is niet vastgesteld.
3. Katalytische omzetting van NO door TiO_2 leidt op basis van het transportproces richting oppervlak tot een potentiële verlaging van maximaal 5%. In het licht van de EU normstelling dient te worden bezien of een katalytische oxidatie van NO aan TiO_2 leidt tot kwantitatieve binding van de reactieproducten aan het oppervlak en er geen reactieproducten vrij komen (NO_2) Er kan ook HNO_3 worden gevormd. Op basis van de reactiviteit van HNO_3 mag worden verwacht, dat deze stof niet in de atmosfeer terecht komt.
4. Planten kunnen door hun grote specifiek oppervlak (LAI) naar verhouding veel verontreiniging afvangen (10-15%). Poreuze schermen met beplanting zullen effectiever zijn dan de combinatie met gesloten schermen. Doorlaatbare schermen met klimplanten voor een geluidsscherm zou effectieve en ruimtebesparende optie kunnen zijn.
5. Vernevelen van water voor en boven een scherm zou vooral de aërosol concentratie omlaag kunnen brengen. Praktijkgebruik in andere situaties (stallen) geeft een theoretische bovengrens van 50% efficiëntie. Langs de weg zal het effect geringer zijn. Kwantitative uitspraken zijn hier niet over te doen. Combinatie met verticale ventilatoren of een luchtscherm is wellicht gunstig.
6. Filtering zou een optie kunnen zijn voor het reduceren van concentraties aan stofvormige verontreiniging gedurende verontreinigings-episoden. Daarbij verdienen elektrisch geladen filters met geringe weerstand de aandacht. Problemen vormen de stevigheid en hoogte van de ondersteunende constructie. Of deze optie haalbaar is, is niet duidelijk.

5 Overzicht van geluidsschermen

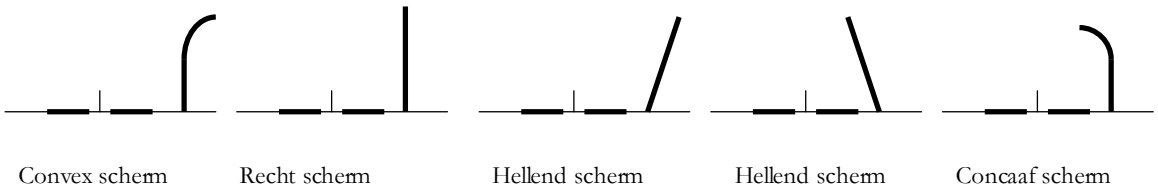
5.1 Algemeen

In voorgaande hoofdstukken is reeds gebleken dat verbetering van de luchtkwaliteit onder invloed van schermen vooral gezocht moeten worden in hoogte en begroeiing. Van de vorm van een scherm wordt veel minder invloed verwacht omdat de afmetingen van windinvloeden veel groter zijn dan met vormafwijkingen van een scherm - zoals het aanbrengen van uitstulpingen o.i.d. - zijn aan te brengen. Daar er, met name aan de woningzijde van de schermen toch enige verschillen op kunnen treden vanwege bij voorbeeld verschillen in optredende turbulentie, zal in de volgende paragraaf een opsomming van de belangrijkste schermtypen gegeven worden, met daarbij een korte uiteenzetting van de te verwachten effecten. Een standaard recht scherm wordt hierbij als uitgangspunt genomen. Hierbij moet nog opgemerkt worden, dat hierover tot nog toe weinig in de literatuur bekend is.

5.2 Schermtypen

5.2.1 Recht scherm

Een verticaal geplaatst recht scherm zal ten opzichte van de situatie zonder scherm de invloed van de weg op de luchtkwaliteit verminderen. De lucht wordt omhoog gedwongen. Hierdoor ontstaat bij meewindsituaties een vrij sterke stijgende luchtstroom die boven het scherm voor turbulentie in de horizontale luchtstroming zorgt, waarbij de door de weg extra vervuilde lucht omhoog gestuwd wordt. Er treedt hierdoor een vrij goede menging van de lucht op, waardoor op vrij korte afstand van het scherm de invloed van de weg op de luchtkwaliteit al sterk vermindert. Opgemerkt moet hierbij worden, dat dit met name geldt voor hogere schermen (tenminste $3m^+$ wegdek). Zoals in hoofdstuk 3 al is aangegeven, vindt, met name onder invloed van het vrachtverkeer in de onderste 3 tot 5m een zodanige opmenging plaats dat bij lagere schermen nauwelijks extra menging met schonere lucht plaats vindt.
Deze effecten zullen niet afhankelijk zijn van het gebruikte schermmateriaal.
Uitgegaan wordt van 3m scherm en hoger.



Figuur 11 Overzicht van een aantal basis typen geluidsschermen

5.2.2 Scherm onder een hoek

Een (recht) scherm onder een hoek met de verticaal geplaatst zal ten opzichte van de situatie met verticaal geplaatst scherm de situatie weinig veranderen. Vanwege de gewijzigde stand gaan er wat andere effecten optreden, afhankelijk van de hoek waaronder het scherm geplaatst wordt. Dit zullen naar verwachting echter secundaire effecten zijn. Als het scherm van de weg afgeplaatst wordt, kan door de verminderde luchtweerstand de verticale luchtsnelheid iets hoger worden waardoor een iets betere menging ontstaat. Of dit onder stabiele omstandigheden tot een wezenlijke verbetering zal leiden, dient nader onderzocht te worden. Als het scherm naar de weg toe geplaatst wordt, zal nabij het scherm een kolom met lucht ontstaan waarin nauwelijks een verticale component aanwezig is, alleen een roterende component en zal het scherm zich gedragen als een recht scherm.

5.2.3 Gebogen scherm

Een (meestal achterover) gebogen scherm zal ten opzichte van de situatie met verticaal geplaatst recht scherm wat meer stroomlijn in de luchtverplaatsing geven, waardoor naar verwachting wat minder turbulentie en derhalve ook wat minder menging kan ontstaan. Nader onderzoek hieraan zal hierover uitsluitsel moeten geven. Er zijn hierover geen meetgegevens bekend.

5.2.4 Middenbermscherm

Middenbermschermen worden op dit moment nog niet veel gebruikt. Op dit moment vindt een onderzoek plaats naar het effect van middenbermschermen op de geluidsbelasting en hoe dit in de standaard rekenmethodieken opgenomen kan worden. Het is daarom te verwachten, dat dit type schermen binnenkort ook (vaker) langs de weg geplaatst zullen worden. Met betrekking tot de luchtkwaliteit beschouwen we weer vooral schermen met een hoogte van tenminste $3m^{+}$ wegdek. Een dergelijk scherm kan een ongunstig effect op de menging van de uitlaatgassen met de lucht hebben, met name in de dagperiode met veel verkeer en dus ook veel vervuiling. Vanwege het rijdende verkeer treedt turbulentie op. Indien de verkeersstromen in beide richtingen relatief dicht langs elkaar rijden, zal vanwege de tegengesteld rijdende voertuigen, met name rond de middelberm forse turbulentie optreden, waardoor op beide weghelften de luchtkolom in de rijrichting fors geremd wordt, zodat de turbulentie bij elk individueel voertuig toeneemt. Indien tussen de weghelften een (relatief hoog) scherm geplaatst wordt, zullen de tegengesteld stromende luchtkolommen elkaar nauwelijks nog beïnvloeden en zal er veel minder turbulentie en dus veel minder menging optreden.

5.2.5 Schermtoppen

De laatste jaren zijn er ook nieuwe ontwikkelingen gaande om (bestaande) schermen effectiever te maken met behulp van speciale schermtoppen:

- prefab geperforeerde schermtoppen met absorptie (mushroom)

- L-vormige opbouw
    - hard
    - absorberend
- T-vormige opbouw
    - hard
    - absorberend
- drievoudige top
    - hard
    - absorberend



Figuur 12 Typen geluidsschermen met schermtoppen.

Naar schermtoppen is juist een onderzoek afgerond. Akoestisch gezien is met name de T-vormige opbouw een interessante variant die naar verwachting op korte termijn toegepast zal worden om bestaande schermen effectiever akoestisch te laten afschermen. Simpel gezegd wordt op een bestaand scherm horizontaal een plaat van 2m geplaatst, zodanig dat aan beide zijden een meter uitsteekt. Er is ook al een aanvullende rekenregel voor opgesteld.
Uit het onderzoek is verder gebleken, dat de prefab geperforeerde schermtoppen met absorptie (mushrooms) nauwelijks een akoestische bijdrage hebben. Omdat zo'n schermtop geplaatst wordt op een punt waar de stroomsnelheid van de lucht bij meewindcondities hoog zijn, kan het echter interessant zin of een dergelijke opbouw schikt gemaakt kan worden om de langsstromende lucht passief dan wel actief te zuiveren. Het onderliggend onderzoek is te algemeen van opzet om hierop nu dieper in te gaan.

De T-vormige top zal naar verwachting voor een luchtturbulentie zorgen die minimaal vergelijkbaar is met een scherm zonder de schermtop. Het is niet te verwachten, dat de turbulentie vanwege de T-vormige top spectaculair toe zal nemen. Hetzelfde geldt voor de L-vormige en de drievoudige top.

5.2.6 Poreuze schermen

Zoals in hoofdstuk 3 is aangegeven, zou een poreus scherm, vooral begroeid, theoretisch een goede oplossing bieden voor de verbetering van de luchtkwaliteit. Er worden echter nog geen

poreuze schermen geproduceerd. Het grote probleem van poreuze schermen is, dat de geluidsisolatie normaal gesproken onvoldoende is. Er is in Duitsland een keer een plan geopperd om een poreus geluidsscherm te ontwikkelen, dat bestaat uit buisjes van verschillende diameter (en eventueel lengte) die zich gedragen als Helmholtzresonator. Een Helmholtzresonator is een akoestisch massa-veer systeem dat afgestemd kan worden op een vrijwel zuivere toon. Met dit systeem zou theoretisch een poreus scherm te ontwerpen zijn waarbij toch het geluid wordt tegengehouden. Er zijn voor zover bekend nog geen werkende exemplaren geproduceerd.

5.2.7 Scherm voorzien van een luchtscherm

Bij een scherm voorzien van een luchtscherm zal de geluidsisolatie, de absorptie en de afscherming van het vaste scherm zelf onveranderd blijven. Het is goed denkbaar dat het luchtscherm de geluidsafscherming afscherming zal verbeteren, omdat de buiging van het geluid niet direct boven op het vaste scherm plaats vindt, maar door het luchtscherm naar boven wordt verplaatst. Daar hier geen metingen van bekend zijn, zal dit onderzocht moeten worden

6 Optimalisatie van schermontwerp voor verbetering van de luchtkwaliteit

6.1 Overwegingen bij de keuze van een schermontwerp

Op basis van de samenvatting van de theorie in hoofdstuk 4 kunnen een aantal ontwerp criteria worden afgeleid voor het ontwerp van schermen in relatie tot het streven naar een zo goed mogelijke kwaliteit van de lucht in de directe nabijheid van een weg. De criteria zijn;

- De luchtsnelheid boven de weg moet zo weinig mogelijk worden verlaagd, teneinde de emissies in zoveel mogelijk lucht op te nemen. Dit betekent dat evt schermen zo gering mogelijke windweerstand moeten hebben (poreus zijn), en meervoudige schermen van uit het oogpunt van luchtkwaliteit zoveel mogelijk worden vermeden.
- Het ruimtebeslag van de schermen moet bij voorkeur gering zijn. De huidige geluidsschermen voldoen hieraan. Poreuze schermen en gaas met klimplanten zou hier ook aan kunnen voldoen.
- Een scherm moet de menging met de bovenlucht (hoog boven de weg) zo veel mogelijk bevorderen, aannemende dat de concentraties in dat luchtpakket lager zijn dan de concentraties boven de weg. Dit geldt overigens de gemiddelde expositie aan verontreiniging. Onder stabiele omstandigheden zal de windsnelheid laag zijn en ontstaat geen lijwervel. De menging met bovenlucht is dan veel geringer en geschiedt alleen door de reeds aanwezige turbulentie door meteorologie en verkeer. De extra turbulentie door de wind opgewekt als gevolg van transport over het scherm is dan gering en draagt nauwelijks bij aan de menging.
- Verhoging van de verliestermen voor verontreiniging is gunstig, omdat deze verliezen betrekking hebben op de totaal aanwezige concentratie ongeacht de herkomst. Verhoging van de permeabiliteit van een scherm vergroot het transport en de turbulentie in het scherm en daarmee de mogelijkheden tot depositie van materiaal. Als deze verhoging van permeabiliteit ook samen gaat met vergroting van het oppervlak (bijvoorbeeld door gebruik van vegetatie) is het effect maximaal.
- De kosten van een scherm nemen toe met de bouwhoogte (fundering en stevigheid in verband met winddruk). Voor verbetering van de luchtkwaliteit is een hoog scherm gunstig door meer inmenging van lucht met achtergrond concentraties.
- Geringe bedrijfs- en onderhoudskosten zijn een wens voor iedere constructie. Passieve constructies (bestaande geluidsschermen van verschillende aard) zijn voordeling in onderhoud (schoonmaken, verfbeurten ect. zijn natuurlijk materiaal afhankelijk). Vegetatie vergt meer onderhoud. Actieve vangst- of verdunningsmechanismen als water nevels, luchtschermen, elektrische precipitatoren, filters, windmolens etc vergen meer onderhoud.
- Gevaar voor mens, dier en ecosysteem vormen het laatste punt in de overwegingen. Gevaar omvat een breed scala aan zaken zoals; Gevaar voor weggebruikers, die naast de weg belanden, fysieke obstakels voor mens en dier als roterende windmolens op lage

hoogte, hoogspanning van een precipitator, gladheid door natte wegen of bladval op de weg, potentiële verspreiding van ziektekiemen (vernevelen van water).

6.2 Score van een aantal schermconfiguraties op de ontwerp criteria.

Duidelijk is, dat verschillende schermconfiguraties op de punten genoemd in paragraaf 6.1 verschillend zullen scoren. Om deze schermconfiguraties te kunnen vergelijken wordt de score op de ontwerpcriteria op een schaal van 3 eenheden vastgelegd;

2 = goede score, gunstige eigenschappen, zeer effectief, geen gevaar etc.
1 = matige score
0 = slechte score op de ontwerp criteria

Daarmee is een vergelijking niet compleet. Er dient ook een weging plaats te vinden tussen belangrijke en minder belangrijke criteria. Daartoe wordt een vermenigvuldigingsfactor gehanteerd, die het relatieve belang van het ontwerp criterium aangeeft. De (arbitraire) weging is als volgt;

1 = concentratie boven de weg + breedte van het scherm.
2 = kosten bedrijfsvoering + menging onder gemiddelde meteorologische omstandigheden.
3 = menging onder stabiele omstandigheden + gevaar + verlies gemiddeld
4 = verhoging van het verlies aan verontreiniging in episode

Door deze weging wordt aan de afvangst van verontreiniging in luchtverontreiniging episoden en afwezigheid van potentiële gevaren een groter gewicht gegeven dan aan de andere ontwerpfactoren. De resultaten van een aantal typen schermen met aanvullende maatregelen zijn in tabel 2 aangegeven en dienen om een keuze te maken ten aanzien van de schermen, waarvoor berekeningen worden uitgevoerd.

Uit tabel 2 blijkt, dat open of gesloten schermen met een groenstrook van voldoende hoogte achter het scherm zowel voor de gemiddelde situatie ten aanzien van de luchtkwaliteit als in luchtverontreinigingsepisoden een gunstige optie vormen.
Een dicht scherm met luchtscherm, dicht scherm met beplanting voor het scherm en permeabel scherm met beplanting voor het scherm scoren ongeveer op hetzelfde niveau. De beplanting vraagt geringe extra ruimte en vangt extra aërosol af, maar is minder effectief tijdens een episode doordat de windsnelheid en daarmee het transport richting vegetatie gering is. Het dichte scherm met luchtscherm geeft geen zaken als bladoverlast (gevaar) en heeft een geringe breedte, maar is ook in episoden door de lage windsnelheid minder effectief. De werking van een luchtscherm is overigens nog niet bewezen.
Eén of twee vaste (kale) schermen en een vast (kaal) scherm met sproeiers scoren ongeveer gelijk, hoewel de situatie met twee schermen door meer windremming boven de weg eigenlijk wat ongunstiger is dan één scherm. De sproeiers hebben een voordeel onder omstandigheden met verhoogde verontreiniging, omdat de afvangst dan ook werkt, doch door de geringe luchtmassa, die wordt gewassen is het effect niet groot.

Tabel 2 Score op ontwerpcriteria en weging van de ontwerpcriteria voor een aantal typen schermen al dan niet aangevuld met maatregelen om de luchtkwaliteit te verbeteren.

	Verlaging C_{weg}	breedte scherm	menging bovenlucht gemid.	menging bovenlucht episode	verhoging verliestermen gemid.	verhoging verliestermen episode	Onderhoud	Gevaar	**totaal score**
1 dicht kaal scherm (éénzijdig)	1	2	1	0	0	0	2	2	**15**
2 dichte schermen (beide zijden van weg) (kaal)	1	2	1	0	0	0	2	2	**15**
3 dichte schermen (tweezijdig + midden scherm)	0	1	0	0	0	0	2	1	**8**
1 dicht scherm+klimop + voorscherm planten	1	1	1	0	1	1	1	1	**16**
1 dicht scherm+klimop + groen scherm achter	1	0	2	1	2	1.5	1	2	**28**
1 dicht (kaal) scherm + luchtscherm	1	2	2	1	0	0	0	2	**16**
1 dicht (kaal) scherm + sproeiers	1	2	1	0	1	1	0	1	**15**
1 dicht (kaal) scherm + windmolens	1	1	1	0	0	0	1	0	**6**
1 permeabel scherm +klimop+ voorscherm plant	2	1	1	0	1	1	1	1	**17**
1 permeabel scherm+ klimop + groen er achter	2	0	2	1	2	1.5	1	2	**29**
1 permeabel kaal scherm + electr. Precipitator	2	1	1	0	1	1	0	0	**12**
weegfactor	1	1	2	3	3	4	2	3	

Voor de elektrostatische precipitator geldt hetzelfde als voor de sproeiers. De score is lager, omdat de gevaren hoger worden ingeschat.
Drie dichte schermen en een scherm(wal) met windmolens scoren slecht als gevolg van gevaar aspecten, windafremming (3 schermen) en geringe effectiviteit van opmenging (windmolen) (TNO, 2005).

6.3 Koppeling van ontwerpen eisen voor verbetering van de luchtkwaliteit aan eisen ter vermindering van geluidsdruk

Uit tabel 2 komen de dichte en de permeabele schermen met achterliggende groenstrook als meest gunstige optie naar voren in relatie tot de luchtkwaliteit dicht bij de weg. Een tweede keus, die vooral van belang is bij geringe beschikbare ruimte zijn dichte of permeabele schermen met daarvoor klimopachtige begroeiing of nog beter een gaasscherm met klimplanten. Het dichte scherm met luchtscherm er bovenop is ook een optie. Hieronder wordt aangegeven wat de consequenties van deze ontwerpen zijn voor de geluidsbelasting achter het scherm.

Schermen worden geluidstechnisch beoordeeld op:
- Afschermende werking;
- Isolatie;
- Absorptie;
- Eigen geluidsproductie.

Het laatste punt is meestal geen probleem met standaard schermen, maar moet wel meegewogen worden, als de mogelijkheid bestaat, dat er vanwege het scherm nieuwe geluidsbronnen worden geïntroduceerd.
De uit tabel 2 geselecteerde schermen zullen op voornoemde punten worden getoetst.
Begroeiing heeft op de afschermende werking van een dicht scherm uitsluitend een (negatieve) invloed als de begroeiing zodanig boven het scherm uitsteekt, dat het geluid via de onderzijde van de boven het scherm uitstekende begroeiing weerkaatst kan worden. Dit treedt vooral op bij bomen indien de onderzijde van de kruin boven het scherm uitsteken. Begroeiing voor of achter een dicht scherm heeft geen invloed op de afscherming .Begroeiing heeft evenmin invloed op de isolatie van een dicht scherm. De absorptie van een hard dicht scherm kan eventueel iets toenemen indien aan de wegzijde (groenblijvende) begroeiing wordt aangebracht. Een min of meer glad dicht scherm zal geen eigen geluidsproductie teweeg brengen. Indien aan een scherm speciale vormen worden aangebracht met uitstekende delen of speciale randen, is het mogelijk dat bij bepaalde windomstandigheden een fluittoon ontstaat.

Voor een al of niet begroeid permeabel scherm zal met betrekking tot afscherming, absorptie en eigen geluid hetzelfde gezegd kunnen worden als voor een dicht scherm. De isolatie zal echter zonder speciale voorzieningen dramatisch teruglopen. Daar een scherm een isolatie dient te hebben die tenminste 10 dB(A) beter is dan de benodigde afschermende werking (zie bij voorbeeld GCW 2001), zal de isolatie van een permeabel scherm al snel niet meer voldoen. Het zal daarom zaak zijn om een permeabel scherm te ontwikkelen met voldoende isolatie. Wellicht kan gedacht worden aan twee of drie achter elkaar geplaatste schermen met openingen die ten opzichte van elkaar verspringen. Het grote probleem hierbij blijft, dat geluid niets anders dan een zich voortplantende trilling in de lucht is: als de lucht voldoende door het scherm kan komen om fijn stof naar de begroeiing te vervoeren, het geluid er naar verwachting ook zodanig goed doorheen gaat, dat de isolatie onvoldoende zal blijken te zijn.
Dit zal echter nader onderzocht moeten worden.

Blijft over het scherm met luchtscherm. In dit geval zal de geluidsisolatie, de absorptie en de afscherming van het scherm zelf onveranderd blijven. Het is zelfs goed denkbaar dat de afscherming zal verbeteren vanwege het luchtscherm. Daar hier geen metingen van bekend zijn, zal dit onderzocht moeten worden. De in situ meetmethode hiervoor is beschreven in de NPR-CEN/TS 1793-4.

Bij dit type scherm zal ervoor gewaakt moeten worden, dat het in stand houden van het luchtscherm niet zelf zodanig geluid produceert, dat het hinder kan opleveren bij de omwonenden. Officieel zijn hier geen wettelijke eisen voor in de Wet geluidhinder, maar er kan in dit geval aansluiting gezocht worden bij de Wet milieubeheer en de Handreiking industrielawaai en vergunningverlening. Hierin worden de volgende waarden aanbevolen als equivalente geluidsniveaus, vallend op de gevel.

Aard van de woonomgeving	Aanbevolen richtwaarden in de woonomgeving in dB(A)		
	dag	avond	nacht
Landelijke omgeving	40	35	30
Rustige woonwijk	45	40	35
Woonwijk in stad	50	45	40

Bij dit laatste type scherm zal tijdig onderzocht moeten worden of het geproduceerde geluidsniveau niet zodanig hoog wordt, dat dit type scherm in veel gevallen onbruikbaar wordt.

7 Schatting van de verbetering in de luchtkwaliteit als gevolg van verbeterd scherm ontwerp.

Op basis van theoretische overwegingen worden in hoofdstuk 6 enkele schermontwerpen gepresenteerd, die potentieel een verbetering van de luchtkwaliteit kunnen geven. Dit zijn;

1. Dicht kaal scherm (als referentie situatie)
2. Dicht scherm met klimplanten er op
3. Poreus scherm met klimplanten erop
4. Poreus scherm met klimplanten erop en gaas met klimplanten ervoor
5. Dicht scherm met klimplanten en een groenstrook er achter
6. Dicht scherm met luchtscherm

7.1 Berekeningen voor fijn stof

De nadruk in de berekeningen ligt bij fijn stof. Hiervoor zijn twee redenen;

1. Fijn stof kent een geringe oppervlakteweerstand, waardoor depositie als afvangst mechanisme effectief kan zijn. Voor NO_x geldt dat veel minder.
2. Door EU eisen aan de nieuwe benzinemotoren in personenauto's zal het lokale NO_2 probleem op termijn tot het verleden behoren. Op korte termijn is er echter nog een aantal jaren sprake van normoverschrijding langs drukke snelwegen. Fijn stof zal een probleem blijven.

De schattingsmethode voor de invloed van schermontwerp op de luchtkwaliteit omvat de volgende stappen

- Bereken de emissieflux van het verkeer.
- Bereken de massaflux voor fijn stof vanaf de weg zonder scherm, bij aanname van een opmeng hoogte van 5 meter
- Schat de invloed van de flux op de concentratie boven de weg.
- Schat de invloed van het scherm op de windsnelheid boven de weg en daarmee de verhoging van de concentratie ten opzichte van een vrije veld situatie.
- Schat de transportweerstanden voor depositie voor een dicht scherm, een poreus scherm en een voorscherm.
- Schat hoeveel materiaal dat voor het scherm langs wordt gevoerd op het scherm deponeert voor dichte schermen.
- Schat hoeveel materiaal extra wordt gedeponeerd indien het scherm met klimplanten is begroeid.
- Schat de hoeveelheid materiaal, die op een poreus scherm met klimplanten wordt gedeponeerd.
- Schat de hoeveelheid materiaal, die op een poreus scherm met klimplanten met daarvoor nog een open scherm met klimplanten wordt gedeponeerd.
- Schat de hoogte boven het scherm, waarin de lucht van voor het scherm wordt getransporteerd voor een dicht en een poreus scherm.

- Bereken een virtuele lijnbron afstand voor het scherm van waaruit de concentraties achter het scherm kunnen worden berekend met reductie van de depositie voor deze bron voor de diverse schermconfiguraties en een gemiddelde (= neutrale) stabiliteit en stabiele situatie.
- Bereken een virtuele lijnbron afstand voor het scherm van waaruit de concentraties achter het scherm kunnen worden berekend zonder reductie van de depositie voor deze bron voor de diverse schermconfiguraties, de hoogte tussen de grens van door depositie beïnvloede en niet beïnvloede lucht en de opmenghoogte van 5 m en een gemiddelde (= neutrale) stabiliteit en stabiele situatie.
- Bereken met een K-type lijnbronmodel de concentraties op vier hoogten (1.5; 4; 8 en16 m) en 5 afstanden tot de weg (4; 8; 16; 32 en 64 m). Voeg daarbij de achtergrond concentraties aan de berekende resultaten toe om de totale concentratie te krijgen.
- Voer de berekening van de virtuele lijnbron en verspreidingberekeningen ook uit voor een situatie zonder scherm (referentie situatie)
- Geef de fractie van de concentratie op de rekenpunten voor de verschillende schermconfiguraties aan ten opzichte van de situatie zonder scherm.
- Voer de berekening voor een dicht scherm ook uit voor een scherm met luchtscherm. Aanname is dat het luchtscherm alleen een verhoging van het scherm bewerkstelligt, die afhankelijk is van de atmosferische stabiliteit (1m bij gemiddelde omstandigheden en 2m bij stabiele omstandigheden). De bijdrage van het luchtscherm aan de verhoging van de turbulentie wordt als gering ingeschat en verwaarloosd.
- Probeer de invloed van al deze processen te schatten op de concentratie als functie van de afstand tot de weg voor twee realistische situaties in Nederland, namelijk de achtergrond concentratie is 20 $\mu g\ m^{-3}$ fijn stof en gemiddelde meteorologie, respectievelijk 35 $\mu g\ m^{-3}$ fijn stof in een stabiele atmosfeer.

De rekenprocedure wordt uitgebreider behandeld in bijlage 1
Aanvullende tabellen zijn te vinden in bijlage 2.
In dit hoofdstuk worden alleen een (selectie van) grafieken getoond.

Enkele belangrijke tussenresultaten van de berekeningen uit bijlage 1 worden hier kort gemeld;

- Het plaatsen van 4 m hoge schermen verhoogt de concentratie t.g.v. het wegverkeer boven de weg met naar schatting 40% als gemiddelde en tijdens atmosferisch stabiele situaties. Betrokken op de totale stofconcentratie is dat 7% en 13%.
- De concentraties boven de weg worden door de verkeersemissies verhoogd. Voor een vierbaansweg met 100.000 voertuigen per etmaal en 14% vrachtverkeer van 20 $\mu g\ m^{-3}$ tot 25 $\mu g\ m^{-3}$ en in episoden met stagnerende uitwisseling van 35 $\mu g\ m^{-3}$ tot 52 $\mu g\ m^{-3}$.

- Depositie kan een belangrijke verlaging van de aërosol flux bewerkstelligen. De omvang van de reductie is sterk afhankelijk van de scherm configuratie. Zie hiervoor tabel 3.

Tabel 3 Reductie door depositie op schermen en begroeiing van de totale aërosol massa flux uitgedrukt als fractie van de flux die op dezelfde plaats naast de weg aanwezig is zonder obstakels.

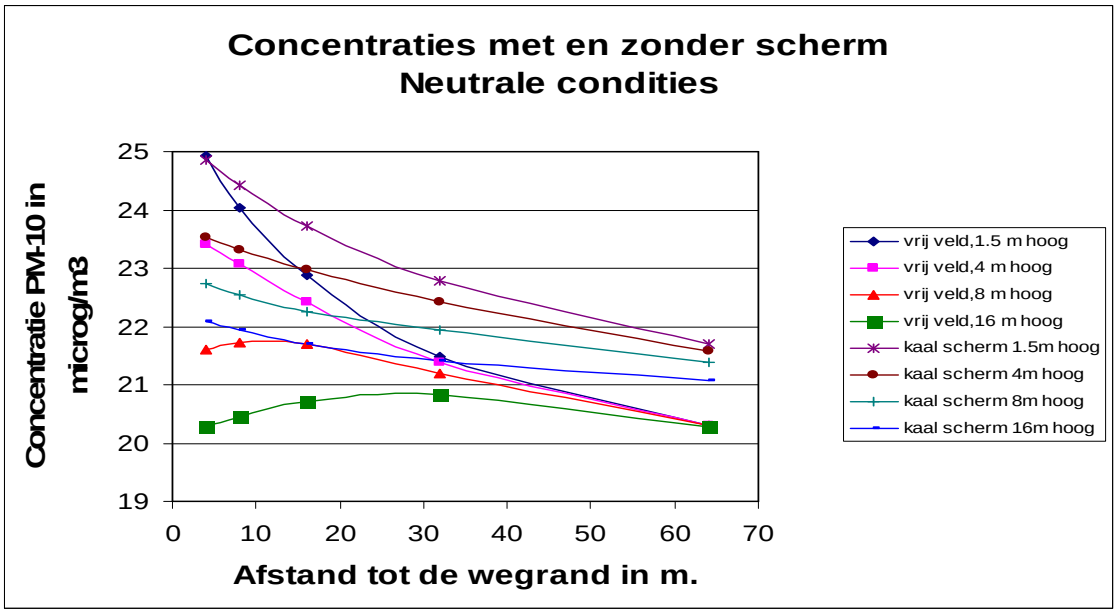
	Referentie flux $\mu g\ m^{-1}\ s^{-1}$	Gemiddelde weers-condities	Stabiele condities
Weg + scherm	321.,7/186.3 *)	98.0 (-2.0%)	96.0 (-4.0%)
Weg + begroeid scherm		81 (-19%)	72 (-28%)
Weg + poreus en begroeid scherm		66 (-44%)	47 (-63%)
Weg +poreus en begroeid scherm + voorscherm		41 (-59%)	15 (-85%)

*) Dit is de flux tgv het verkeer (60.6 $\mu g\ m^{-1}\ s^{-1}$)vermeerdert met de achtergrondflux (261.1 $\mu g\ m^{-1}\ s^{-1}$ neutrale condities, $z_0 = 0.25$) resp. (125.7 $\mu g\ m^{-1}\ s^{-1}$ stabiele condities, $z_0 = 0.25$ m)

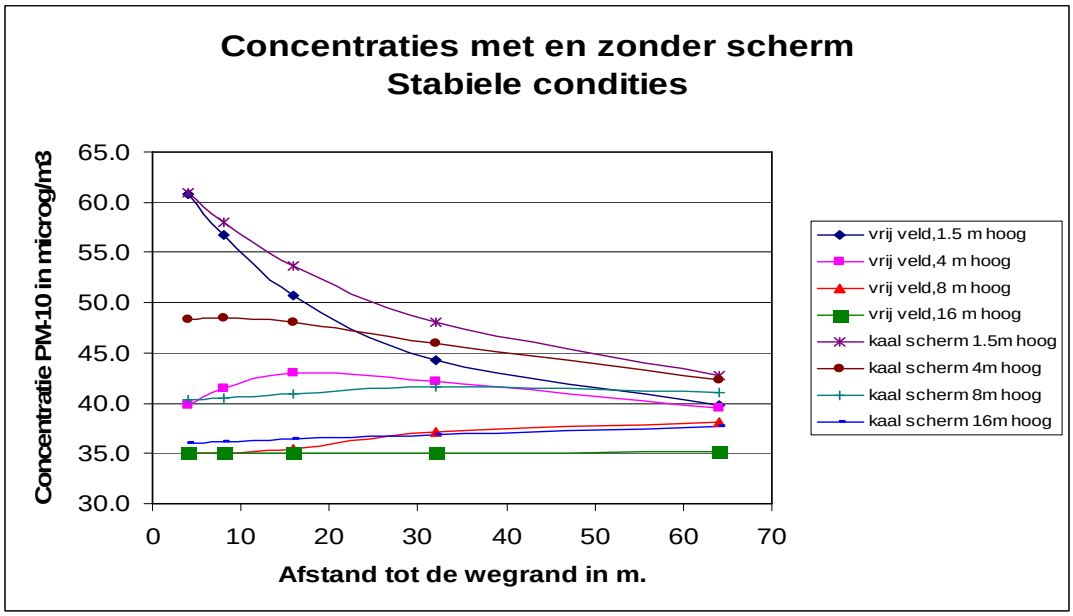
- De verspreidingberekeningen vertonen een verhoging van de concentraties dicht langs de weg en laag bij de grond, voornamelijk door verschil in gebruikte ruwheidslengte. Dit effect overschaduwt het verlies aan materiaal door depositie van fijn stof op het scherm. Figuur 13 geeft dit weer voor neutrale condities, figuur 14 voor uitwisselingsarme condities. Duidelijk is dat de concentraties onder uitwisselingsarme condities tot boven toelaatbare niveaus stijgen.
- Het effect van vegetatie op een scherm, op een poreus scherm en het effect van een doorlaatbaar begroeid scherm voor een begroeid poreus scherm is in de figuren 15 (neutraal) en 16 (stabiel) voor een hoogte van 1.5 m en in de figuren 17 en 18 voor een hoogte van 4 m afgezet tegen de concentraties achter een kaal scherm. De reductie in concentraties is duidelijk. Ook duidelijk is, dat onder stabiele omstandigheden de concentraties achter een kaal scherm op 1.5 m hoogte hoog zijn en pas op afstanden van meer dan 25 meter de 50 $\mu g\ m^{-3}$ onderschreiden. Met vegetatie zijn de concentraties beduidend lager.

De laatste constatering betekent, dat er onder stabiele atmosferische condities en kale schermen altijd voldoende afstand tot de weg dient te zijn om tot acceptabele concentratieniveaus te komen. Dit roept de gedachte op om een met klimplanten begroeid scherm te combineren met een 50 m brede strook vegetatie.

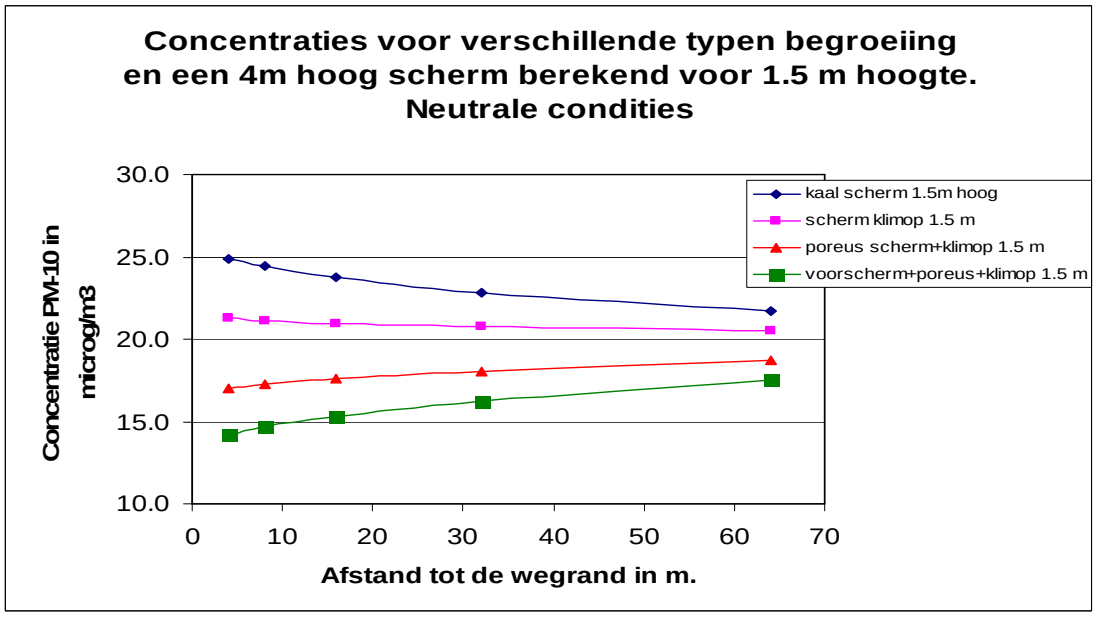
Die vegetatie zou voldoende hoog moeten reiken (20 m) en geoptimaliseerd moeten worden om een vrij uniforme dichtheid van blad/naalden en takken met de hoogte te verkrijgen.
De rekenwijze is weer aangegeven in bijlage 1.
Voor neutrale en stabiele condities is het verloop van de concentraties met de afstand en de hoogte in de figuren 19 en 20 weergegeven.



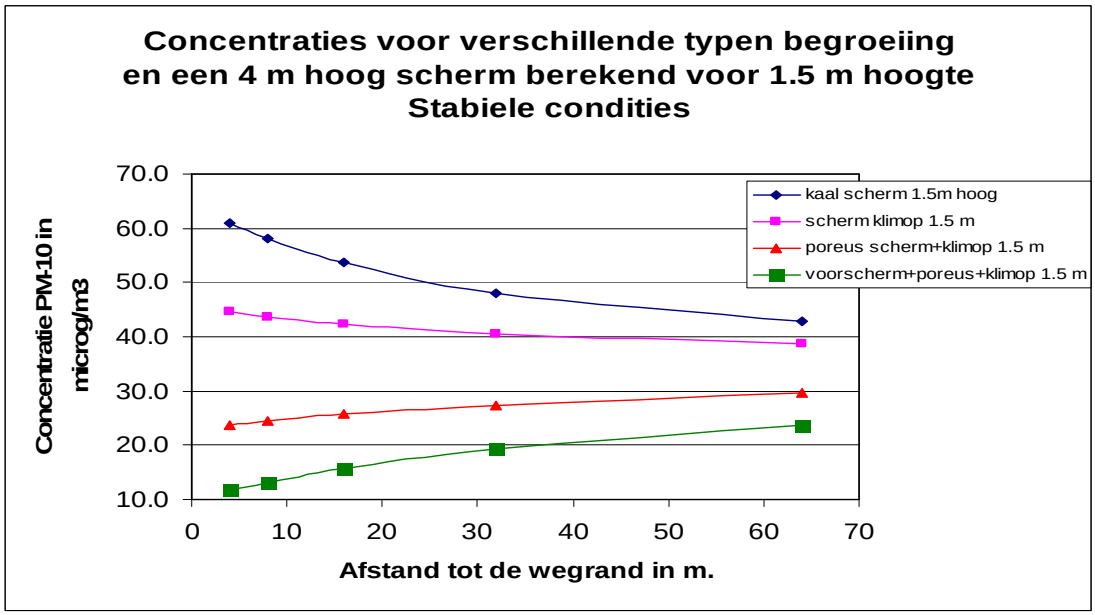
Figuur 13 Gemiddelde concentraties onder gemiddeld neutrale condities langs een vierstrooks snelweg met 100.000 voertuigen per etmaal zonder geluidsscherm (vrij veld) en met een kaal geluidsscherm op de hoogten 1.5, 4, 8 en 16 m.



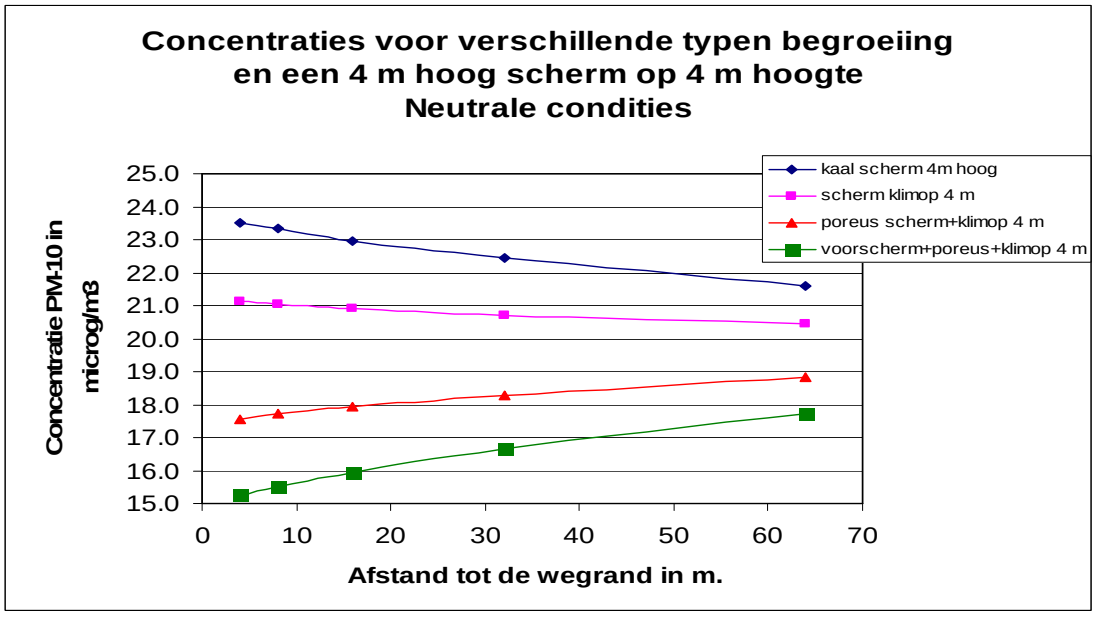
Figuur 14 Gemiddelde concentraties onder stabiele condities langs een vierstrooks snelweg met 100.000 voertuigen per etmaal zonder geluidsscherm (geen) en met een kaal geluidsscherm (kaal) op de hoogten 1.5, 4, 8 en 16 m.



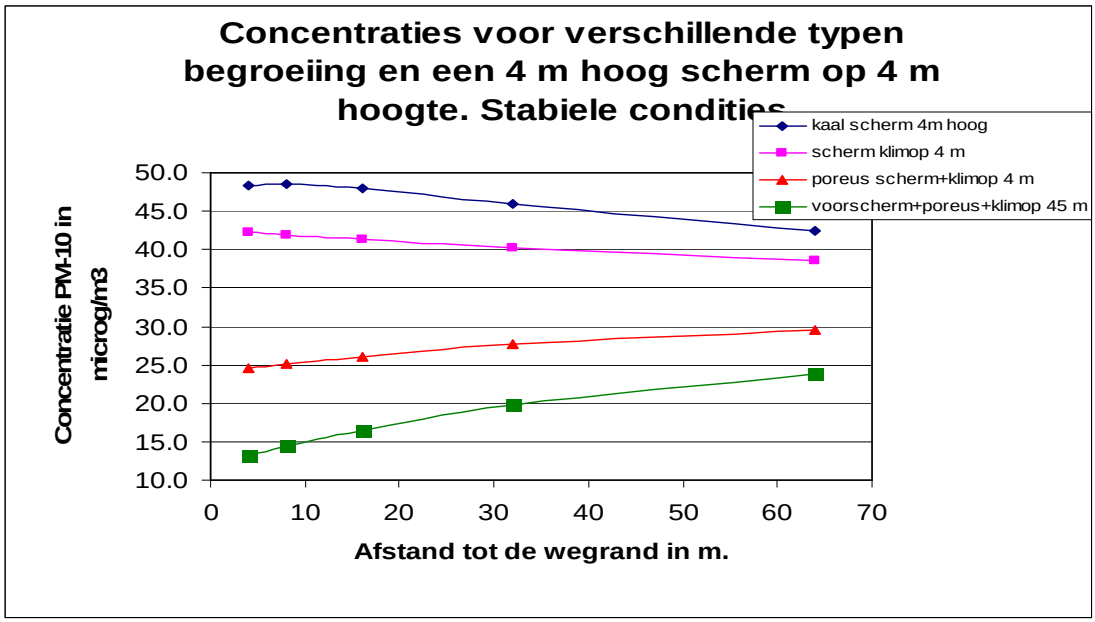
Figuur 15 Gemiddelde concentraties onder gemiddeld neutrale condities langs een vierstrooks snelweg met 100.000 voertuigen per etmaal met een kaal geluidsscherm (kaal), met klimop begroeiing, met een poreus scherm en klimop en een doorlaatbaar voorscherm met klimop gevolgd door een poreus scherm met klimop op een hoogte van 1.5 m.



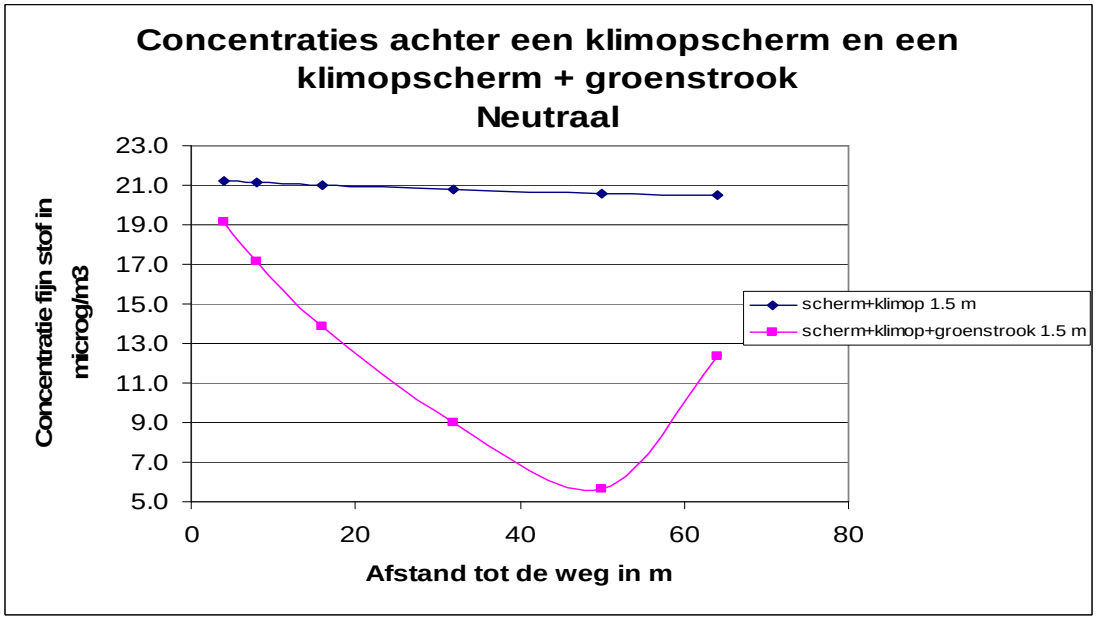
Figuur 16 Gemiddelde concentraties onder stabiele condities langs een vierstrooks snelweg met 100.000 voertuigen per etmaal met een kaal geluidsscherm (kaal), met klimop begroeiing, met een poreus scherm en klimop en een doorlaatbaar voorscherm met klimop gevolgd door een poreus scherm met klimop op een hoogte van 1.5 m



Figuur 17 Gemiddelde concentraties onder gemiddeld neutrale condities langs een vierstrooks snelweg met 100.000 voertuigen per etmaal met een kaal geluidsscherm (kaal), met klimop begroeiing, met een poreus scherm en klimop en een doorlaatbaar voorscherm met klimop gevolgd door een poreus scherm met klimop op een hoogte van 4 m.

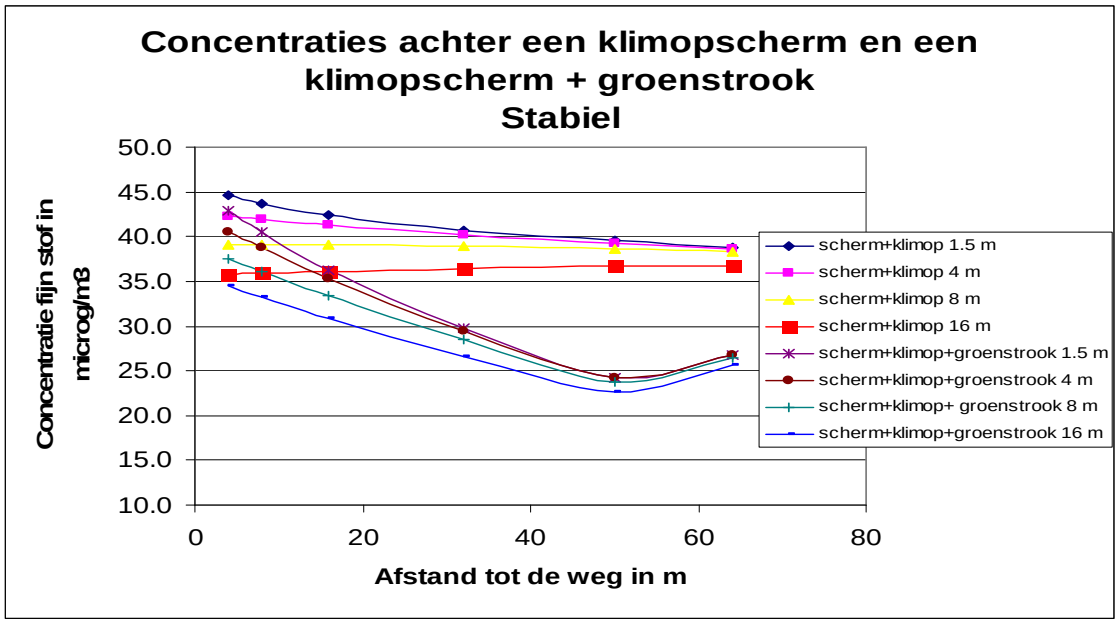


Figuur 18 Gemiddelde concentraties onder stabiele condities langs een vierstrooks snelweg met 100.000 voertuigen per etmaal met een kaal geluidsscherm (kaal), met klimop begroeiing, met een poreus scherm en klimop en een doorlaatbaar voorscherm met klimop gevolgd door een poreus scherm met klimop op een hoogte van 4 m.



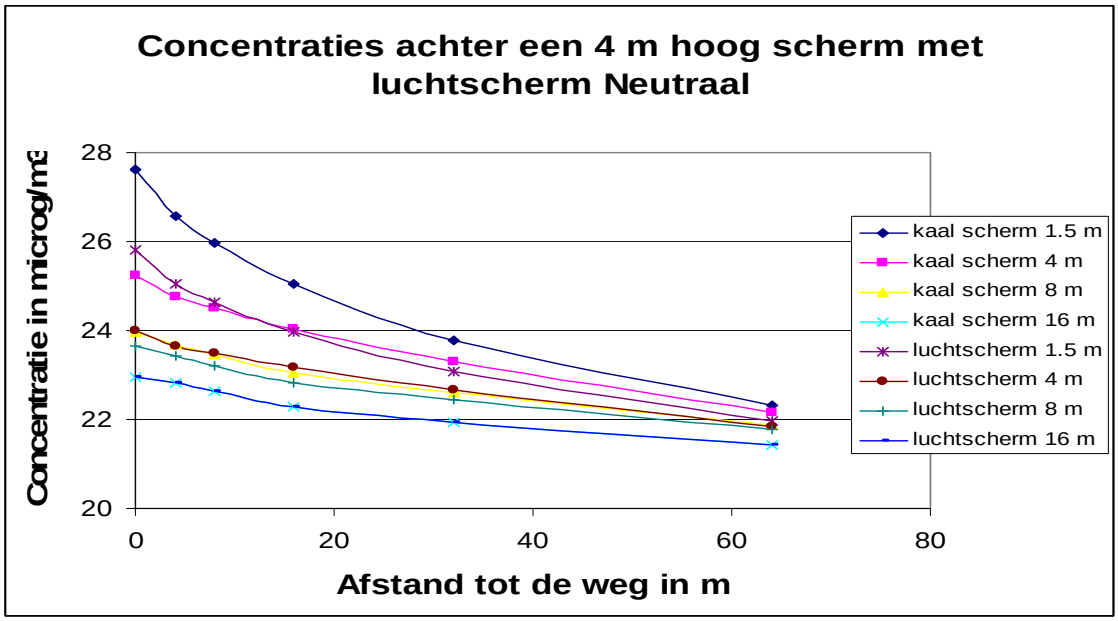
Figuur 19 Concentratieverloop met de afstand voor de hoogte van 1.5 m voor een vierstrookssnelweg met 100.000 voertuigen per etmaal bij plaatsing van een met klimplanten begroeid scherm van 4m hoogte en een groenstook van 50 m breed en 20 m hoog achter dit scherm. Gemiddeld neutrale atmosferische condities.

Het oplopen van de concentraties achter de groenstrook (tussen 50 en 64 m) wordt veroorzaakt door inmenging van lucht met achtergrondconcentraties, die hoger zijn dan de concentraties in de lucht na het passeren van de groenstrook. Onder stabiele situaties is dit effect minder sterk, omdat de inmenging minder intens is. (zie figuur 20).
Duidelijk is te zien, dat een scherm van geoptimaliseerd ontwerp een grote bijdrage kan leveren aan de verbetering van de luchtkwaliteit.

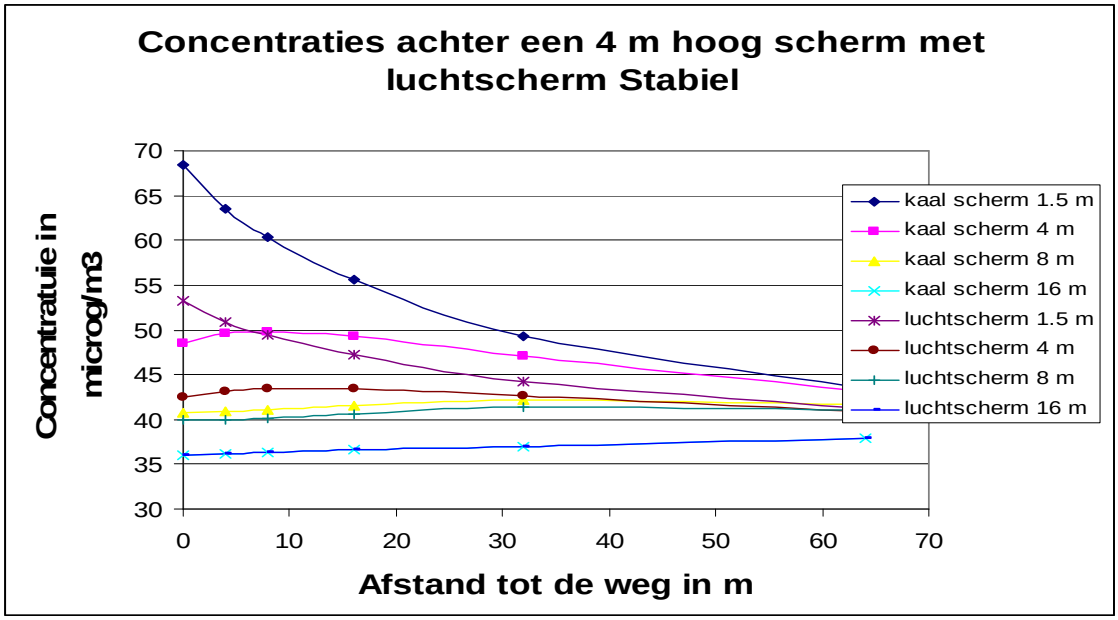


Figuur 20 Concentratieverloop met de afstand voor de hoogten 1.5, 4, 8 en 16 m voor een vierstrookssnelweg met 100.000 voertuigen per etmaal bij plaatsing van een met klimplanten begroeid scherm van 4m hoogte en een groenstook van 50 m breed en 20 m hoog achter dit scherm. Stabiele atmosferische condities.

Tot slot kan gedacht worden aan het aanbrengen van een luchtscherm bovenop en 4 m hoge geluidswand. Het effect bestaat vooral uit het verhogen van de effectieve hoogte van het geluidsscherm en daarmee een toevoeging aan de turbulentie intensiteit. De rekenwijze wordt weer uitgewerkt in bijlage 1. In figuur 21 wordt het geschatte effect van het luchtscherm vergeleken met dat van een kaal scherm voor neutrale condities, in 22 voor stabiele condities. Met name voor de stabiele condities en korte afstanden kan een luchtscherm verbetering in de luchtkwaliteit bewerkstelligen. In de berekeningen is rekening gehouden met verhoging van de turbulente inmenging van achtergrondslucht door de schijnbare verhoging door het luchtscherm. Deze verhoging is echter ook afhankelijk van de windsnelheid, een factor die bij gebrek aan gegevens niet is meegenomen. De schatting moet daarom voorzichtig worden gehanteerd.



Figuur 21 Concentratieverloop met de afstand voor de hoogten 1.5, 4, 8 en 16 m voor een vierstrookssnelweg met 100.000 voertuigen per etmaal bij kaal geluidsscherm van 4m hoogte en een scherm voorzien van luchtscherm. Gemiddeld neutrale atmosferische condities.



Figuur 22 Concentratieverloop met de afstand voor de hoogten 1.5, 4, 8 en 16 m voor een vierstrookssnelweg met 100.000 voertuigen per etmaal bij kaal geluidsscherm van 4m hoogte en een scherm voorzien van luchtscherm. Stabiele atmosferische condities.

7.2 Werking van schermen voor NO_x

Na de uitgebreide behandeling van de invloed van diverse schermontwerpen op fijn stof concentraties kan de behandeling van NO_x kort blijven. In het OPS model (van Jaarsveld, 1995) wordt een oppervlakte weerstand voor NO_x aangenomen van 600 s m^{-1}. Dit is een gemiddelde voor NO en NO2, waarbij de oppervlakteweerstand voor NO_2 lager is dan voor NO. Vergelijken we dit met een gemiddelde transportweerstand in de atmosfeer van 20-30 s m^{-1} (aerodynamische weerstand plus grenslaagweerstand)en een oppervlakteweerstand voor fijn stof van 0 s m^{-1}, dan wordt meteen duidelijk, dat een concentratieverlaging voor NO_x bewerkstelligd moet worden door extra verdunning met lucht met een achtergrondconcentratie. Op grond van de vorige paragraaf kan dat door gebruik van hoge schermen of gebruik van een lager scherm in combinatie met een rij bomen achter het scherm. Veel vegetatie heeft technisch gezien niet veel zin, omdat de depositie nauwelijks een rol speelt. De vergroting van de verdunning door de toenemende afstand speelt natuurlijk wel een rol.
De situatie wordt voor NO_x anders indien we in staat zijn de oppervlakteweerstand te verkleinen. Dit zou mogelijk kunnen door schermen van een katalytische laag te voorzien. Nemen we daarvoor een oppervlakteweerstand van 0 s m^{-1} aan, dan worden de berekeningen gelijk aan die voor fijn stof. Op een kaal scherm komt dan tussen 2 en 4 % van de som van emissie plus achtergrondflux terecht. Voor meer effect is ook hier vergroting van het katalytisch oppervlak noodzakelijk. Dit zou kunnen door het plaatsen van poreuze voorschermen of poreuze schermen op het scherm (poreuze katalytische top).
Schattingen kunnen worden gemaakt aan de hand van de berekende effecten voor fijn stof, door rekening te houden met het verschil in effectief vangend oppervlak en/of rekening te houden met de extra verdunning door verhoging van een scherm of verhoging van de turbulentie door plaatsing van bomen.

8 Discussie

De oriënterende berekeningen in dit rapport geven aan, dat de hoogte van een scherm en de combinatie met vegetatie tot verbetering van de luchtkwaliteit in de directe omgeving kan leiden. De resultaten van de berekeningen komen goed overeen met het beperkte aantal meetresultaten dat gevonden is (zie de figuren 8 en 9). Anderzijds is voor de inschatting van de extra verdunning door inmenging van lucht met achtergrondconcentraties gebruik gemaakt van langjarig bepaalde empirische gegevens (Esser en Hasskelo, 2000). Dit is gedaan omdat deze meetresultaten uit een lange meetreeks als meer representatief worden beschouwd dan resultaten uit windtunnel studies, waarin vaak niet onder stabiele of onstabiele condities kan worden gewerkt.
Hoewel de schattingen zo zorgvuldig mogelijk zijn uitgevoerd moesten toch een groot aantal aannamen met betrekking tot verspreiding, turbulentie en depositie worden gedaan. De resultaten zijn soms sterk van de aannamen afhankelijk. Een aantal vragen en onzekerheden worden hier op een rijtje gezet;

- Er is een opmenging boven de weg tot 5 m aangenomen. Bekend is dat deze opmenging afhankelijk is van verkeersintensiteit, percentage vrachtwagens en atmosferische stabiliteit. Gebruik van deze parameters in de schatting van de initiële spreiding in plaats van een gemiddelde zou de werkelijkheid dichter benaderen. Dit mengvolume heeft een grote invloed op de concentraties boven de weg waar verder mee wordt gerekend.
- Het aantal virtuele bronnen dat wordt gehanteerd heeft een invloed op de concentratieprofielen, die worden verkregen. Het gebruik van meer dan drie bronnen geeft wellicht een nog realistischer beeld.
- De aanname van een oppervlakte laag waar uit de depositie plaats vindt is door de demping van de luchtbeweging voor het scherm verdedigbaar, doch door de turbulentie van het langsrijdende verkeer zal meer menging optreden dan zonder verkeer. De laag kan daardoor dikker zijn met minder concentratie afname in de laag (de depositie blijft gelijk).
- De depositie op begroeide schermen wordt waarschijnlijk overschat. De begroeiing remt de luchtsnelheid, waardoor minder verversing optreedt en de gemiddelde concentratie binnen de vegetatielaag/bladlaag iets lager zal zijn.
- Bij de berekening van de depositie op schermen met leiplanten, poreuze schermen met leiplanten en poreuze schermen met leiplanten en voor scherm is geen rekening gehouden met de invloed van depositie op de aangeboden concentraties. Zeker daar waar de concentratie verlaging erg hoog is (klimop + poreus scherm + voorscherm met klimop) zal dat een overschatting van de depositie geven en daarmee een overschatting van het effect op de luchtkwaliteit.
- Voor de groenstrook is wel rekening gehouden met de invloed van de depositie op de concentratie. De berekening is in dit geval uitgevoerd voor een groenstrook van optimaal ontwerp met een maximum aan mogelijk bladoppervlak. Bij minder optimale situaties zal de hoeveelheid bladoppervlak ongeveer de helft zijn van de hier gehanteerde 0.9 m^2 m^{-3}. het effect van zo'n groenstrook is ook evenredig minder. Anderzijds is met de

enkelvoudige LAI gerekend, terwijl fijn stof op zowel de bovenzijde als de onderzijde van het blad zal neerdalen. Het effect van een groenstrook is daarmee voor PM-10 waarschijnlijk wat overschat en voor PM-2,5 onderschat.

- De invloed van de hoogte van het scherm en een groenstrook op de turbulente inmenging van lucht is moeilijk te onderbouwen.
- De hoogte tot waar een luchtscherm in de buitenlucht nog effectief is, is zeer onzeker

Een aantal onzekerheden zijn op te heffen door windtunnelstudies en praktijkmetingen.
Het gebruik van een model, dat de stroming rond schermen en vegetatie goed simuleert en ook de depositieprocessen goed heeft geïmplementeerd kan uitkomst bieden. Zo'n model dient aan praktijkmetingen te worden getoetst.

9 Samenvatting en conclusies

Schermen langs een weg geven in vergelijking tot een situatie zonder schermen aanleiding tot verhoging van de concentraties boven de weg en in de direkte nabijheid van de weg door verlaging van de windsnelheid en verhoging van de ruwheid. Een scherm zorgt echter ook voor extra turbulente inmenging van lucht met achtergrondconcentraties, waardoor weer een daling van de concentraties optreedt (aanname is dat de achtergrondconcentratie lager is dan de concentratie in de lucht, die van de weg af komt). Deze extra inmenging van lucht kan worden versterkt door verhoging van het scherm en/of plaatsing van hoge bomen direct achter het scherm.

Er zijn een aantal voorstellen voor verbetering van de luchtkwaliteit rond geluidsschermen. Dit zijn; begroeiing van de schermen, sproeiers met water op of voor de schermen, windmolens bij de schermen, gebruik van permeabele schermen, gebruik van elektrische precipitatoren, gebruik van filters, gebruik van een luchtscherm bovenop het geluidsscherm en gebruik van groen achter de schermen. Deze voorstellen zijn beoordeeld op effectiviteit voor verbetering van de luchtkwaliteit, ruimtebeslag, werking gedurende episoden van slechte luchtkwaliteit, onderhoudsgevoeligheid en gevaar voor verkeer of omwonenden.
Op basis van score en weging op deze punten zijn alleen, al dan niet poreuze schermen in combinatie met vegetatie of een luchtscherm veelbelovend. Voor een aantal van deze combinaties zijn kwantitatieve schattingen voor de werking in relatie tot fijn stof uitgewerkt.

Vergroting van de depositie van fijn stof door vergroting van het vangend oppervlak (leiplanten en begroeide voorschermen) kan een belangrijke reductie van fijn stof concentraties betekenen. Begroeiing van een scherm met klimop kan op korte afstanden achter het scherm (20 m) en geringe hoogte (tot 4m) een reductie in concentraties geven van zo'n 13% als gemiddelde en 10% voor stabiele atmosferische omstandigheden. Begroeide poreuze schermen zij door hun oppervlaktevergroting effectiever (30% resp. 50%), doch zullen geluidstechnisch nadelen hebben. Plaatsing van een luchtdoorlaatbaar voorscherm verbetert de luchtkwaliteit nog meer.

Vergroting van het oppervlak heeft weinig effect voor NO_x, omdat de oppervlakteweerstand voor deze stof erg hoog is. Oppervlaktevergroting is slechts zinvol als het oppervlak wordt behandeld met een katalysator (TiO_2) of een andere oppervlakte actieve stof, waardoor de grenslaag weerstand wordt verlaagd. Op een kaal scherm is de maximale depositie 2-4% van de totale flux(verkeersemissie plus achtergrondflux). Oppervlakte vergroting voor met katalysator behandelde schermen is dus nodig om merkbaar effect te krijgen. Naast de toepassing van oppervlakteactieve middelen is voor NOx alleen verhoging van turbulente inmenging van lucht met achtergrond concentraties effectief in verbetering van de luchtkwaliteit. Dit betekent verhoging van schermen of plaatsing van hoge beplanting bij het scherm.

Een luchtscherm zorgt vooral voor effectieve verhoging van het geluidsscherm, met daardoor meer inmenging van achtergrondlucht. Voor gemiddelde omstandigheden kan bij effectieve verhoging van het scherm van 4 m naar 5.5 m de reductie in concentraties direct achter het scherm 6% bedragen. Voor stabiele omstandigheden is de schermverhoging door het luchtscherm effectiever en wordt de reductie in concentraties direct achter het scherm geschat op omstreeks 30 %.

Omdat ondanks vergroting van de depositie, de verdunning door inmenging met lucht met een achtergrondconcentratie een belangrijke factor is in de afname van de concentratie, is voldoende afstand tussen receptor en weg van groot belang. Onder stabiele atmosferische condities, waarin die verdunning minder sterk is, geldt dat nog sterker dan voor neutrale of onstabiele condities. Plaatsing van een groenstrook van voldoende hoogte en optimale structuur in de ruimte die noodzakelijkerwijs tussen weg en receptor moet worden gehouden, werkt sterk verbeterend voor de luchtkwaliteit. Omgekeerd geredeneerd kan een groenstrook de noodzakelijke afstand tussen weg en receptor reduceren.

Voor de uitvoering van de schattingen zijn een groot aantal aannames gedaan. Voorzichtigheid is geboden bij het gebruik van schatting van de absolute concentratieniveaus, omdat deze sterk afhangen van de aangenomen hoogte boven de weg, waarin de emissies worden opgemengd. Voor het luchtscherm geldt, dat vooral de schatting van de extra inmenging met lucht met achtergrondconcentratie als functie van de hoogte onzeker is. Bij toepassing van vegetatie kan er enige overschatting zijn, omdat niet in alle gevallen rekening is gehouden met de invloed van depositie op het concentratiepatroon en daarmee de depositie verder van de weg af. Er is bovendien gerekend met een optimale vegetatie, terwijl het effectief bladoppervlak in de praktijk vaak geringer zal zijn.

10 Aanbevelingen

De discussie in hoofdstuk 8 geeft inzicht in een groot aantal onzekerheden, die bij de uitvoering van kwantitatieve schattingen van het effect van schermontwerp op de luchtkwaliteit aan het licht kwamen.

Een eerste onzekerheid is de hoogte tot waar de emissies van het wegverkeer worden opgemengd. Hooghiemstra (1987) geeft een empirische vergelijking, die op een groot aantal metingen langs de A50 is gebaseerd. De geldigheid voor hogere verkeersdichtheden en specifiek voor stabiele omstandigheden verdient nadere studie. In verband met problemen om in windtunnels stabiele omstandigheden te simuleren verdienen praktijkmetingen de voorkeur.

De stroming over een scherm, de menging van de lucht uit verschillende lagen en daarmee de optredende concentraties achter een scherm verdient nadere aandacht. Over het optreden van lijwervels (neutrale atmosferische condities) is het nodige bekend, maar modellering van de menging is een probleem. Minder is bekend over de stroming en menging onder stabiele condities. Neutrale situaties kunnen goed worden gesimuleerd in een windtunnel en met een hoogte verstelbare lijnbron met tracergas. Voor de meer complexe stabiele situatie is er de keuze uit aanpassingen aan de windtunnel of praktijkmetingen, waarbij het stromingveld en de menging goed in kaart wordt gebracht.

Onzekerheden in het depositieproces dienen te worden geëlimineerd door uitvoering van praktijkmetingen. Doordat de depositieprocessen (diffusie, impactie, sedimentatie en forese) deeltjesgrootte afhankelijk zijn laten deze processen zich niet schalen en zijn windtunnel metingen alleen te interpreteren als er weer een groot aantal aannamen worden gedaan. Daarmee neemt de onzekerheid niet af.

Windtunnel metingen zijn aan te bevelen voor bepaling van de oppervlakteweerstand van NO_x binders op een oppervlak en kwantificering van het effect van oppervlaktevergroting op de potentiële depositie van NO_x .

Windtunnelmetingen kunnen een belangrijke rol spelen bij de bepaling van het effect van schermverhoging op de turbulentie en inmenging van lucht met achtergrondconcentraties. Een vraag is hier weer in hoeverre dit ook kan voor stabiele situaties, die met het oog op overschrijding van luchtkwaliteitsnormen juist interessant zijn.

Groenstroken zijn stromingstechnisch en qua turbulentie complex. Ook de vocht- en energiehuishouding speelt hier een rol in de uitwisseling. Gecombineerd met de complexe invloed van deze factoren op het depositieproces zijn praktijkmetingen het meest zinvol, mits daarbij voldoende parameters worden mee gemeten, zodat generalisatie mogelijk is.

De kwantificering van het effect van schermontwerp op de luchtkwaliteit is complex. Hiervoor kunnen twee wegen worden bewandeld. Dit zijn;

- De hier bewandelde weg van eenvoudige modellen en aannamen
- Het gebruik van een procesmodel.

De simpele benadering vergt nadere onderbouwing van een aantal aannamen en schattingen en een gevoeligheidsanalyse voor parameters.
Het procesmodel dient niet alleen de stroming goed te beschrijven onder onstabiele tot stabiele condities, maar ook de verliesprocessen goed te simuleren.

11 Literatuur

Aarnink, A.J.A, Landman, W.J.M, Melse, R.W, de Gijsel, P, Thuy, A.H.T, Fabri, T. 2004. Voorkomen van verspreiding van ziektekiemen en milieuemissies via luchtreiniging. A&F rapport 059, pp 63.

Aarnink, A.J.A, van der Hoek, K.W, 2004. Opties voor reductie van fijn stof emissie uit de veehouderij. A&F rapport nr 289, pp 31, RIVM rapport 680.500.001.

Beck, J.P, Annema, J.A, van den Brink, R.M.M, Hammingh, P, Smeets, W.L.M. 2005 Effecten van aanvullende maatregelen op knelpunten voor luchtkwaliteit. Milieu- en Natuurplanbureau-RIVM. Briefrapport pp 43

Burg, J, van der. 2004 Dispersion behind a livestock building. WU Meteorology and Air Quality. Student report pp54

Brunekreef, B, Holgate,S.T. 2002 Air pollution and health (Review). The Lancet Vol 360, 1233-1242.

Buringh, E. 1980 Over het atmosferisch gedrag en de emissie van submicrone verkeersaerosolen. Diss. Landbouw Hogeschool Wageningen, pp138

CROW 2001 Richtlijnen geluidbeperkende constructies langs wegen. Publikatie 166 (GCW-2001) pp 150.

CROW 2005 Wegen naar een schonere lucht; Mogelijkheden voor verbetering van de luchtkwaliteit langs wegen. Publikatie 218a. pp 40.

Dunnett, N. en Kingsbury, N., 2004. Planting green roofs and living walls.Timber Press, Portland, Oregon, VS.

Erbrink, J.J.H, 1995. Turbulent diffusion from tall stacks; The use of advanced boundary layer meteorological parameters in the Gaussian dispersion model "Stacks". Dissertation VU-Amsterdam, pp 227

Esser, J, Hasskelo, H. 2000. Ausbreitung von Luftschadstoffen ohne bzw. Mit Lärmschutzwand. Bundesanstalt für Stassenwesen Slussbvericht zum AP-Projekt nr 93 663/V3.pp 50 excl bijlagen.

Fuchs, N.A, 1964 The mechanics of aerosols. Pergamon Press Oxford.

Geurs, K.T, Annema, J.A, van den Brink, R.M.M. 2004 Quick scan milieu-effecten Nota Mobiliteit. RIVM rapport 500021001/2004, pp 37.

Gryning, S.E, Holtslag, A.A.M, Irwin, J.S, Sievertsen, B. 1987 Applied dispersion Modelling based on meteorological scaling parameters. Atmos. Env. 21, 79-89.

Hanna, S.R, 1981 Applications in air pollution modeling. in; Atmospheric turbulence and air pollution modelling (Nieuwstadt, F.T.M, and van Dop, H eds.) p 275-310

Heimann, D. 2003 Meteorological aspects in modeling noise propagation outdoors. Paper ID:213-IP, Euronoise Naples, 2003, pp5

Heij, G.J, Schneider, T. 1994 Eindrapport Additioneel programma verzuringsonderzoek, derde fase (1991-1993) RIVM rapport 300-05, pp160

Hofschreuder, P, Slanina, J, Vila Guerau de Arellano, J. 2004. Air Quality Practical. Manual 2004, Meteorology and Air Quality Group WUR, pp 130. (in English)

Hofschreuder,P, Vonk, A.W, Heeres, P. 1999. Tracer gas experimenten in de Flevopolder; Vergelijking van gemeten concentraties met gesimuleerde concentraties met een Gauss model, het ASZ model en een K-type model. WU meteorologie en luchtkwaliteit rapport R 835, pp 72.

Hooghiemstra, J.S, 1987. Stikstofoxiden langs een snelweg; Voortsgezette gegevensverwerking en formulering van een verspreidingsmodel. Landbouwuniversiteit Wageningen, Luchthygiëne en – verontreiging, verslag R190. pp 55.

Hosker, R,P,jr. 1981 Methods for estimating wake flow and effluent dispersion near simple block-like buildings. Air Resources Labs, Silver Spring, Maryland, NOAA Technical memorandum ERL ARL-108.

Huber, A.H. 1989. The influence of building width and orientation on plume dispersion in the wake of a building. Atmosf. Environm. 26B; 4, 2109-2116.

Jaarsveld, H.A, 1995. Modelling the long-term atmospheric behaviour of pollutants on various spatial scales.
Dissertation Utrecht University, pp 235.

Jacobs, A.F.G. 1983 Flow around a line obstacle. Diss. Landbouwhogeschool Wageningen 28 Sept. pp 105

Kanaoka, C, Emi, H, Ishiguro, T. 1984. Time dependency of collection performance of electret filter. Aerosols, (Lui, Pui and Fissan eds), Elsevier p613-616.

Li, Z.J, Miller, D.R, Lin, J.D, 1985. A first order closure scheme to describe counter-gradient momentum transport in plant canopies. Boundary Layer Meteorology, 33:77-83.

McMahon, T.A, Denison, P.J. 1979. Atmosf. Environment, 13; 571-585.

Moyer, E.S, Bergman, M.S. 2000. Electrostatic N-95 respirator filter media efficiency degradation resulting from intermittent sodium chloride aerosol exposure. Applied Occupational and Environmental Hygiene, 15, (8), 600-608.

Nasrullah, N., Tatsumoto H., en Misawa, A., 1994. Effect of roadside planting and road structure on NO2 concentration near roads. Japanese Journal of Toxicology and Environmental Health 40: 328-337.

Olesen, H, Rørdam,, H, Genikhovich, E. 2000 . Building downwash algorithm for the OML atmospheric dispersion model. Department of Atmospheric Environment, Research Notes from NERI no 123, Roskilde, Denmark.

Pruppacher, H,R, Klett, J,D. 1998. Microphysics of clouds and precipitation; Second revised and enlarged edition with an introduction to cloud chemistry and cloud electricity. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, Kluwer Academic publishers.

Renterghem, T van, Botteldooren, D, 2002 Effect of a row of trees behind noise barriers in wind. Acta Acustica united with Acustica 88; 869-878.

Renterghem, T van, Botteldooren, D, 2002 Reducing Screen-induced refraction of noise barriers in wind by vegetative screens. Acta Acustica vol 88, 231-238.

Renterghem, T van, Botteldooren, D, 2003 Numerical simulation of the effect of trees on downwind noise barrier performance.. Acta Acustica united with Acustica 89; 764-778.

Salomons, E,M, Rasmussen, K,B. 2000. Numerical computation of sound propagation over a noise screen based on an analytic approximation of the wind speed field. Applied Acoustics 60, 327-341.

Schweikle, V., 1999. Schadstoffgehalte an landgebundenen Verkehrswegen. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe. 1-38.

Slanina, J. 2004. Air Quality. Reader for BSc and MSc. Meteorology and Air Quality Group WUR, pp 340. (in English)

Stull, R.B, 2000 Meteorology for Scientists and Engineers (2nd edition) Brooks/Cole, Thomson learning.

Thönnessen, M., 2005. Feinstaub und Innerstädtisches Grün - Eine Übersicht. Universität zu Köln, April 2005.

TNO Bouw en Ondergrond, 2005. Memorandum luchtschermen pp12

Tonneijck A.E.G. en Blom-Zandstra M., 2002. Landschapselementen ter verbetering van de luchtkwaliteit rond de Ruit van Rotterdam. Een haalbaarheidsstudie. Nota 152, Plant Research International, Wageningen.

Turner, D.B, 1969 Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates. U.S. dept of Health, Education and Welfare, national Air Pollution Control Administration, Cincinnati, Ohio, pp 84.

Vincent, J.H, 1986. Indsutrial hygiene implications of the static electrification of workplace aerosols. Journal Electrostatics, 113-145

Visser, G.Th, Weststrate, J.H. 2005. Windtunnelonderzoek naar het effect van horizontale as windturbines op een geluidswal op de locale NO2 en PM-10 concentraties. TNO rapport R&I-A R2005/067 versie2.

Wieringa, J, Rijkoort, P.J, 1983. Windklimaat van Nederland. Staatsuitgeverij Den Haag, pp 263.

Wesseling, J.P., Duyzer, J., Tonneijck, A.E.G. en Van Dijk, C.J., 2004. Effecten van groenelementen op NO_2 en PM10 concentraties in de buitenlucht. Rapport R 2004/383. TNO, Apeldoorn.

Wesseling, J, Visser, G.Th. 2003. An intercomparison of the TNO traffic models, field data and windtunnel measurements. TNO report R 2003/207

Yamashita en Yamamoto, 1990, Scale model experiments for the prediction of road traffic noise and the design of noise control facilities. Applied Acoustics 31; 185-196.

Verklarende woorden lijst

u* = wrijvingssnelheid. Wortel uit het product van horizontale windsnelheids fluctuaties u' en verticale windsnelheidsfluctuatie w'. Geeft de effectiviteit van verticaal transport weer als gevolg van de wrijving van lucht van grotere hoogte en met grotere snelheid over langzamer stromende lucht van lagere hoogte.
z_0 = ruwheidslengte. Hoogte waarop het gemiddelde windsnelheid nul wordt door wrijving met de vegetatie, Als vuistregel is z_0 gelijk aan 0.1 maal de gewashoogte.
D = nulvlaksverplaatsing. Schijnbare verplaatsing van het nulvlak voor de windsnelheid voor hoge vegetatie. Als vuistregel gelijk aan 0.6-0.7 maal de gewashoogte.
Mechanische turbulentie. Wervels, die in de atmosfeer ontstaan door wrijving van de wind over ruwe oppervlakken.
Thermische turbulentie. Wervels, die ontstaan door instraling van de zon op het aardoppervlak, waardoor warme bellen lucht opstijgen.
Inversie laag. Laag lucht, waarin de temperatuur toeneemt met de hoogte in plaats van de normale afname van gemiddeld 0.6 ^oC per 100m. De inversielaag onderdrukt verticaal transport.
Stabiele atmosfeer. Temperatuurgradiënt in de atmosfeer, die minder is dan -0.6 ^oC per 100 m tot zelfs positief, waardoor alle verticaal transport wordt onderdrukt en weinig menging optreedt.
Onstabiele atmosfeer. Temperatuurgradiënt in atmosfeer van de meer dan 0.6 ^oC per 100m waardoor verticale luchtbewegingen worden versterkt en er een intensieve menging optreedt.
LAI of leaf area index. Het aantal vierkante meters blad/naaldoppervlak per vierkante meter grondvlak. Let erop dat de LAI eenzijdig kan zijn (alleen de bovenzijde van de bladeren) zoals dat van belang is bij depositie van grof aërosol op het blad, of tweezijdig bij de depositie van gassen en kleine deeltjes, die op beide zijden van een blad terecht kunnen komen.
Oppervlakteweerstand. Weerstand tegen transport aan een oppervlak in s m^{-1}. Voor oplosbare gassen sterk afhankelijk van de vochttoestand van het oppervlak.
Aërodynamische weerstand. Weerstand tegen transport in de atmosfeer. Sterk afhankelijk van de turbulentie intensiteit.
Grenslaag weerstand. Weerstand tegen transport in de vrijwel stilstaande luchtlaag direkt bij een oppervlak. De weerstand wordt in belangrijke mate bepaald door de diffusiteit van deeltjes of gassen.
Luchtscherm. Sterke spleetvormige luchtjet boven op het scherm (10-20 ms^{-1}), die de langsstromende lucht te dwingt over deze jet heen te gaan. Het is een feitelijke verhoging van het scherm, zonder dat in zwaardere fundamenten hoeft te worden geïnvesteerd.
Achtergrondflux. Hier horizontaal transport van massa over een lengte van 1m langs de weg en tot een bepaalde hoogte. Integraal van het product van concentratie en windsnelheid met de hoogte. Door de lage windsnelheid dicht bij de grond is de fluxdichtheid (achtergrondflux) daar klein en neemt de flux bij constante achtergrondconcentratie toe met de hoogte. De flux is hiermee ook afhankelijk van de ruwheid van het terrein (z_0). Bij grote ruwheid bijvoorbeeld bij

een scherm) is de windsnelheid op geringe hoogte van de grond lager dan in een situatie van een vrij liggende weg. Ook de atmosferische stabiliteit heeft invloed op het windsnelheidsprofiel. Om deze redenen is voor de situatie met en zonder scherm en voor neutrale en stabiele atmosferische condities steeds een andere achtergrondflux gebruikt.

Verkeersflux. Massa aan aërosol afkomstig van het verkeer, die per tijdseenheid windafwaarts van de weg door een vlak met een breedte van 1 m en een hoogte van de opmenghoogte van het verkeersaërosol (5m) loodrecht op de dwarsdoorsnede van de weg stroomt. Door gebruik van constante emissiefactoren is deze flux onafhankelijk van weersomstandigheden of terrein ruwheid.

Bijlage 1 Schatting van de invloed van scherm ontwerp op concentraties naast een weg.

In de literatuur zijn weinig gegevens voorhanden, die de invloed van schermontwerp op de aërosol concentraties achter het scherm aangeven. Om toch het relatieve belang voor verbetering van de luchtkwaliteit voor diverse ontwerpen te kunnen schatten wordt hier een eenvoudige rekenprocedure voorgesteld.

Voor de schatting dienen een aantal aannamen te worden gemaakt. Deze zien er als volgt uit;

1. De breedte van de weg is 4 rijbanen van 3.25 m, een middenberm van 1 m en een zijberm van 1m. (16 meter)
2. De verkeersintensiteit is 100.000 voertuigen per etmaal met 14 % vrachtverkeer.
3. De opmenging van de verkeersemissies is instantaan en homogeen tot een hoogte van 5 m.
4. De depositie van emissies uit de uitlaat op de weg (fijn stof) wordt gecompenseerd door de fijne stof fractie van resuspenderend materiaal, zodat we voor fijn stof netto te maken hebben met een massa gelijk aan fijn stof uit de uitlaat. Het grove stof van bandenslijpsel, uit de uitlaat en van resuspensie wordt niet in de berekeningen betrokken.
5. De gemiddelde windsnelheid op 10 meter hoogte is gelijk aan 4 m s^{-1}, de windsnelheid tijdens uitwisselingsarme omstandigheden is op 10m hoogte gelijk aan 1.1 m s^{-1}.
6. Het concentratieprofiel is de eerste meters boven de grond vrij recht en strekt zich uit tot ver boven het scherm, waardoor de invloed van het scherm op het concentratieprofiel verwaarloosd kan worden.
7. Bij geringe depositie is de invloed van de depositie op de getransporteerde hoeveelheid massa verwaarloosbaar voor benedenwinds gelegen punten.

Schatting van de aërosol flux veroorzaakt door het verkeer

De fijn stof emissie is volgens het CAR model bij een snelheid van 100 km h^{-1} in 2005 voor een personenauto 0.03 g km^{-1} $voert^{-1}$ en 0.19 g km^{-1} $voert^{-1}$.
De gemiddelde snelheid is 100 kmh^{-1} ≅ 27.8 m s^{-1}.
De verkeersdichtheid is gemiddeld 1.16 voertuig per seconde bestaande uit 1 personen auto per seconde en 0.16 vrachtauto per seconde.
De emissieflux voor personen auto's is gelijk aan; $(0.03/1000)*10^6$= 30 μg m^{-1} s^{-1}.
Voor vracht auto's is dit $(0.19/1000)*10^6*0.16$ = 30.6 μg m^{-1} s^{-1}.
De totale verkeer gerelateerde flux aan fijn aërosol wordt daarmee 60.6 μg m^{-1} s^{-1}.

Gemiddelde windsnelheid boven de weg

Nemen we een instantane menging boven de weg aan en een windsnelheid van 4 m s^{-1} als gemiddelde en 1.1 m s^{-1} gedurende een episode op 10 m hoogte, dan kunnen we een gemiddelde representatieve windsnelheid voor de opmeng hoogte (5 m) boven de weg uitrekenen door het logarithmisch windsnelheidsprofiel te integreren tussen 0 en 5 m en te delen door de

integratiehoogte van 5 m. Hiertoe is het logarithmisch windprofiel voor neutrale condities gebruikt..

$$U_z = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z-D}{z_0}\right)$$

Invullen van U_{10} = 4m s^{-1}, z = 10 m en z_0 = 0. 1 m levert een u* waarde op van 0.35 m s^{-1} voor neutrale condities en met U10 = 1.1 m s^{-1} een u* waarde van 0.1 m s^{-1} voor stabiele condities. De gemiddelde windsnelheid voor de eerste 5 m boven de grond bedraagt 2.5 m s^{-1} voor neutrale condities (representatieve hoogte 1.8 m) en 0.7 m s^{-1} voor stabiele condities (representatieve hoogte 2.3 m) voor een weg zonder scherm.

Concentratieverhoging boven de weg

Door een oppervlak van 5* 1 = 5 m^2 (de hoogte van opmenging is 5 m en de flux is uitgedrukt in μg m^{-1} s^{-1} dus we berekenen ook het lucht debiet per strekkende meter) stroomt 5* 2.54 = 12.7 m^3 lucht per seconde onder gemiddelde weerscondities en 5 * 0.7 = 3.5 m^3 lucht per seconde in een episode.

Door homogene instantane menging aan te nemen is de concentratie boven de weg constant en is de fijn stof flux door het 5 m^2 grote vlak loodrecht op de weg gelijk aan de emissieflux, 60.6 μg s^{-1} . De evenwichtsconcentratie boven de weg wordt dan bepaald door de hoeveelheid lucht die door dat vlak stroomt. De bijdrage van het verkeer aan de concentratie boven de weg berekenen we dan als 60.6/12.7 = 4.8 μg m^{-3} als gemiddelde situatie en 60.6/3.5 =17.4 μg m^{-3} gedurende een episode.

Tel dat bij de aangenomen achtergrondconcentratie van 20 μg m^{-3} als gemiddelde en 35 μg m^{-3} voor een episode en we komen tot totale concentraties van 25 en 52 μg m^{-3}.

Windremming voor een scherm en invloed op de concentratie boven de weg

Een scherm zorgt voor windremming voor het scherm (zie figuur 4). Ook voor een poreus scherm zal de windsnelheid boven de weg afnemen. Dit wordt gedeeltelijk gecompenseerd door hogere windsnelheden vlak boven het scherm. Het is nodig weer enkele aannamen te doen, die bij uitgebreider studie van stroming in windtunnels kunnen worden verbeterd.

Het eerste effect van het scherm is, dat de oppervlakteruwheid wordt verhoogd. We nemen nu een ruwheidslengte van 0.25 m aan. Daarmee verandert het windsnelheidsprofiel en het berekende debiet. De berekende debieten zijn nu 11.1 en 3.0 m^3 s^{-1}. Daarnaast is behalve de ruwheid ook de windkering van het scherm van belang.

De aanname is nu dat voor de bovenste 2/3 van een 4 m hoog scherm de windsnelheidsverlaging voor het scherm wordt gecompenseerd door een windsnelheidsverhoging boven het scherm. Er is dus geen netto effect op de getransporteerde hoeveelheid lucht over het scherm. Voor de onderste 1/3 wordt een snelheidsreductie van gemiddeld 20% aangenomen voor een dicht scherm en 10 % voor een poreus scherm. Dit betekent 0.6 m^3 s^{-1} minder lucht op een totaal luchtdebiet van 11.1 m^3 s^{-1} onder gemiddelde condities. De verhoging in concentratie boven de

weg bij plaatsing van een dicht scherm komt daarbij door windkering en verhoging van de ruwheid op {12.7/(11.1-0.6)}*100% -100= 20 % voor gemiddelde condities (en wind in de richting van het scherm). De concentratie stijgt van 4.8 μg m^{-3} (verkeersbijdrage) naar 6.6 μg m^{-3}. De achtergrondconcentratie verandert niet, zodat de totale gemiddelde concentratie 7+ 20 = 27 μg m^{-3} wordt.
Op gelijke wijze is een verhoging van de concentratie in situaties van episoden te berekenen van 23 %, resulterend in een concentratie van 24+35 = 59 μg m^{-3}.
Voor een poreus scherm zijn de effecten minder. Het effect van dichte en poreuze schermen op de concentratie boven de weg is in tabel 4 aangegeven.

Tabel 4 Verhoging van de concentraties boven een weg bij plaatsing van een 4 m hoog dicht scherm of een even hoog poreus scherm en bij wind in de richting van het scherm.

	Gemiddelde weersituatie	**Stagnerend weer**
Geen scherm		
Verhoging van de concentratie *)	0%	0%
Verkeersbijdrage aan conc.	4.8	17.4
Achtergrond conc.	20	35
Totale conc.	25 μg m^{-3}	52 μg m^{-3}
Dicht scherm		
Verhoging van de concentratie	20.4 %	22.6 %
Verkeersbijdrage aan conc.	6.6	24.4
Achtergrond conc.	20	35
Totale conc.	27 μg m^{-3}	59 μg m^{-3}
Poreus scherm		
Verhoging van de concentratie	17.1 %	19.27 %
Verkeersbijdrage aan conc.	6.4	23.7
Achtergrond conc.	20	35
Totale conc.	26 μg m^{-3}	59 μg m^{-3}

*) Dit is de verhoging van de concentratie t.g.v verkeersemissies. De achtergrondconcentratie wordt constant verondersteld.

We zien dat de schermen door de geringe bijdrage van het verkeer aan de totale concentratie een kleine verhoging van de concentratie te zien geven

Depositie van materiaal op een al dan niet begroeit scherm
De depositie van fijn stof per m^2 kan worden uitgerekend als product van een concentratie en een depositiesnelheid. Vermenigvuldiging met het aandewindse oppervlak per strekkende meter weg levert een verlies in microgrammen per seconde. Voor de concentraties worden de waarden uit tabel 4 gehanteerd.
De berekeningen worden uitgevoerd voor vier situaties;

- Dicht scherm
- Dicht scherm met begroeiing (LAI=5)

- Poreus scherm (porositeit ε = 30%)
- Poreus scherm met begroeiing (LAI=5, ε = 30%)
- Poreus scherm met begroeiing (LAI= 5, ε = 30%) en voorscherm (LAI = 5)

Voor de berekeningen zijn een aantal aannamen gedaan;

1. De verticale positie van het scherm geeft voor fijn aërosol dezelfde mechanismen voor depositie als voor horizontale depositie.
2. Omdat de stroming het scherm en eventuele klimplanten die er in een laag op groeien als een vrij glad oppervlak ziet, wordt een de zelfde ruwheidslengte z_0 van 0.25 m aangehouden als voor het totale profiel langs de weg.
3. Verkeer voegt extra turbulente energie toe aan de lucht boven de weg. De turbulente kinetische energie is gelijk aan TKE = ½ m(u'+v'+w')^2. Waarin m de massadichtheid van de lucht is (kg m^{-3}) en u'; v' en w' de fluctuaties van de windsnelheidscomponenten in gemiddelde- , zijdelingse- en verticale richting weergeven. Aan gezien geldt dat u*=√u'w' zal verhoogde turbulentie zich uiten in quadratische verhoging van u*. We schatten de extra turbulentie bijdrage van het verkeer in op 20% onder gemiddelde omstandigheden en 40% onder stabiele omstandigheden (minder atmosferische turbulentie en naar verhouding grotere in vloed van het verkeer).
4. We berekenen de transportweerstand en depositiesnelheid met behulp van deze verhoogde u* . De verhoging bedraagt $1.2^2 = 1.44$ voor de gemiddelde situatie en $1.4^2 = 1.96$ voor de stabiele situatie. R_a wordt berekend met;

$$R_a = \frac{1}{k.u*}\left(\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right)$$

   Omdat de oppervlakte weerstand R_c voor deeltjes wordt geschat op 0 s m^{-1} (zie OPS model) en de grenslaagweerstand R_b zeer laag is (enkele s m^{-1}) worden beide op nul gesteld. De depositiesnelheid wordt nu berekend uit;

$$v_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_c} \cong \frac{1}{R_a}$$

5. De gedeponeerde massa per tijdseenheid aan aërosol (μg s^{-1}) wordt nu verkregen door de concentratie (μg m^{-3}) te vermenigvuldigen met de depositiesnelheid (m s^{-1}) en het oppervlak per strekkende meter scherm (m^2).
6. Voor de begroeid scherm wordt het oppervlak verhoogd met de Leaf Area Index (LAI)(m^2 bladoppervlak per m^2 scherm). De depositie wordt dus evenredig hoger.
7. Voor een poreus scherm is een porositeit van 30% aangenomen, verdeeld over 100 gaten van 12 cm diameter per vierkante meter scherm en een dikte van het schermvan 5 cm. Dit geeft een extra oppervlakte vergroting. De depositiesnelheid is constant gehouden.
8. Bij een poreus en begroeid scherm met voorscherm is nog eens het oppervlak met de LAI van het voorscherm verhoogd.

9. Alle depositie fluxen kunnen worden uitgedrukt als percentage van de flux aan getransporteerd materiaal door het vlak ter hoogte van de rand van de weg zonder depositie. De resultaten van de schattingen zijn in tabel 5 weergegeven.

Uit de berekeningen blijkt, dat de depositie op een kaal scherm eigenlijk gering is. Relateren we de afname van de massaflux door depositie (orde van 2-4%) aan de toename van de concentratie door obstakelstroming van omstreeks 7-13% van de totale concentratie dan kan de afname van de concentratie, die achter schermen wordt geconstateerd ten opzichte van een situatie zonder schermen alleen worden verklaard door de virtuele verhoging van de bron en daardoor menging met de bovenlucht, die het scherm opwekt.

Tabel 5 Reductie door depositie op schermen en begroeiing van de totale aërosol massa flux uitgedrukt als fractie van de flux die op dezelfde plaats naast de weg aanwezig is zonder obstakels.

	Referentie flux $\mu g\ s^{-1}$	Gemiddelde weers-condities	Stabiele condities
Weg + scherm	321.6/186.3 *)	98.0 (-2.0%)	96.0 (-4.0%)
Weg + begroeid scherm		81 (-19%)	72 (-28%)
Weg + poreus en begroeid scherm		66 (-44%)	47 (-63%)
Weg +poreus en begroeid scherm + voorscherm		41 (-59%)	15 (-85%)

*) Dit is de flux tgv het verkeer (60.6 $\mu g\ m^{-1}\ s^{-1}$)vermeerdert met de (zie verklarende woordenlijst)

Schatting van de ligging van de virtuele bron voor de door depositie beïnvloede lucht
Bij de aannames werd al aangegeven, dat we een homogene menging van de emissies in het luchtvolume boven de weg aannemen. Met zo'n volume bron valt op korte afstanden moeilijk te rekenen. Het is niet ongebruikelijk om een volume bron te vervangen door een virtuele bron die tegen de wind in wordt geplaatst en waarvan de spreiding van de pluim ter hoogte van het centrum van de volume bron gelijk is aan de verticale afmetingen van die volume bron.

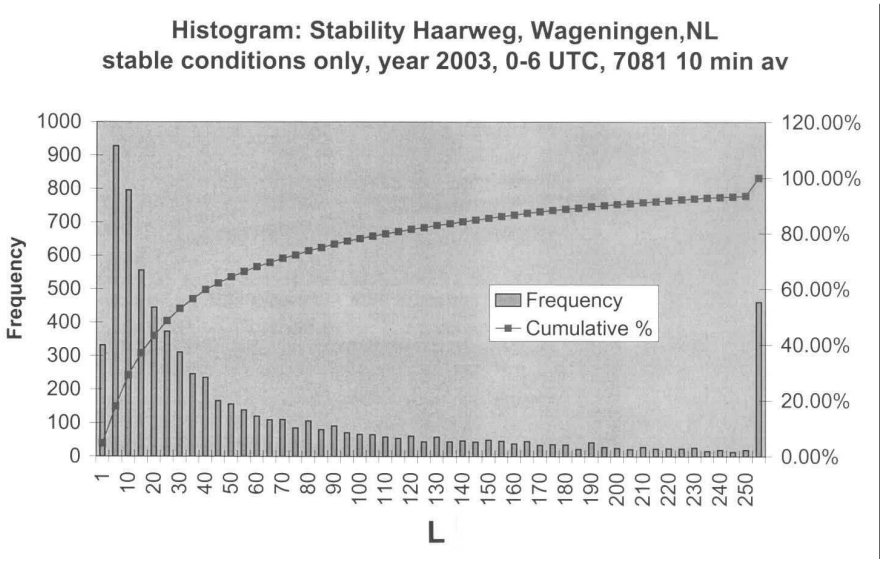
Voor de situatie van de weg onderscheiden we zes virtuele bronnen;

- Drie virtuele bronnen voor een weg zonder scherm. De eerste bron bevindt zich in het midden van de door depositie beïnvloede luchtlaag. De bron wordt zover bovenwinds geplaatst dat de spreiding van de pluim midden boven de weg (8m van de wegrand) voor het scherm 1.2 m bedraagt. De hoogte van deze virtuele bron is 0.6 m. De tweede bron wordt representatief geacht voor de goed gemengde tussenlaag (1.2-2.5 m). De bron

wordt geplaatst op een hoogte van ½*(2.5-1.2= 1.85 m. De derde laag is de laag tussen 2.5 en 5m hoogte. De bronhoogte wordt daar gesteld op 3.75 m.
De ruwheid waarmee wordt gerekend is gering (weinig obstakels) (0.1 m) voor een kale weg.

- De virtuele bronnen voor een situatie met scherm worden vergelijkbaar geplaatst. Er wordt hier echter gerekend met een hogere ruwheid, nl 0.25 m. Dit betekent dat de virtuele bronnen op verschillende afstanden bovenwinds van de weg zullen liggen. De verspreidingsparameters (stabilitietsafhankelijk) bepalen de bovenwindse afstand van de virtuele bron.

Voor de keuze van de verspreidingsparameters wordt aangesloten bij de schatting voor het een K-type verspreidingsmodel (Gryning et al, 1987). Dit type model voldoet het best voor berekening uit lage bronnen (Hofschreuder et al, 1999). Voor het gebruik van een verspreiding model dient de stabiliteit te worden geschat. Voor neutrale condities is een Monin Obukhov lengte (maat voor de atmosferische stabiliteit) gebruikt van -9999 en voor stabiele condities L= +10.
De keuze voor een waarde -9999 (had ook + 9999 kunnen zijn) wordt ingegeven door het feit, dat de Monin Obukhov lengte (L) naar oneindig gaat voor neutrale condities. De waarde voor L van 10 is gekozen op basis van de verdeling van waarden van L voor de Haarweg in Wageningen (zie figuur 23). Daarbij zij alleen de nachtelijke waarden gebruikt. De waarden voor stabiele omstandigheden overdag waren ook interessant geweest, maar vertonen op basis van theoretische gronden (vaak gemeten in overgangssituaties van dag naar nacht en omgekeerd en daardoor niet gemeten in een constante situatie) te veel spreiding om een goede schatting mogelijk te maken.



Figuur 23 Verdeling van waarden voor de Monin-Obukhov lengte (L) op de Haarweg in Wageningen in 2003. Hoge waarden wijzen op een situatie, die naar neutrale atmosferische condities evolueert.

De virtuele bronafstand wordt berekend met;

$$x_0 = \frac{H}{k^2}.\left[\ln\left(\frac{c.H}{z_0}\right) - \psi\left(\frac{c.H}{L}\right)\right]$$

met ; H = effectieve bronhoogte (m)
k = von Karmann constante (hier 0.41)
c = constante (0.6)
L = Monin Obukhov lengte (m)
Ψ = Stabiliteitscorrectie

De stabiliteitscorrectie Ψ wordt berekend met;

$$\psi = \left\{\left(1 - a_1.\frac{H}{L}\right)^{1/2} - 1\right\}^2 \quad \text{voor L} < 0$$

$$\psi = -0.988205891.\frac{H}{L} \quad \text{voor L} > 0$$

Zowel voor de situatie zonder scherm als met scherm onderscheiden we drie bronnen, namelijk een bron voor de laag, waaruit depositie plaats vond een bron voor de tussenlaag en een bron voor de bovenste laag. Theoretisch zou voor de situatie zonder scherm met één virtuele bron worden gewerkt (op 2. 5m hoogte). Dit is niet gewenst, omdat het aantal bronnen dat wordt onderscheiden enige invloed heeft op de vorm van de som van de concentraties berekend uit de verschillende pluimen. De invloed van de pluimconfiguratie wordt geïllustreerd in tabel 6, waarin de som van de verkeersbijdragen voor 1 bron en twee bronnen (met in totaal gelijke bronsterkte en geen depositie) is weergegeven voor neutrale condities. De verschillen geven in indicatie van de onzekerheid in berekende concentraties als gevolg van bepaalde aannamen.

Nemen we een uniforme flux dichtheid in de hoogte aan dan kan deze berekend worden uit de totale flux als;

$$F_{dH} = \frac{F}{M.1}$$

Met F_{dH} = gemiddelde fluxdichtheid over de initiële menghoogte ($\mu g\ m^{-2}\ s^{-1}$)
F = totale flux aan fijn stof afkomstig van het verkeer ($\mu g\ s^{-1}$)
M = menghoogte van de emissies (5 m)
1 = breedte van de lijnbron (1 m)

De sterkte van de virtuele lijnbron wordt nu berekend uit;

$$E_H = F_{dH}.z - Dep$$

Met E_H = lijnbronsterkte ($\mu g\ m^{-1}\ s^{-1}$)
z = hoogte waarover de fluxdichtheid wordt geïntegreerd
Dep= gedeponeerde massa ($\mu g\ m^{-1}\ s^{-1}$)

Tabel 6 Vergelijking van berekende verkeersbijdragen voor neutrale condities uitgaande van 1 bron op 2.5 m hoogte en drie bronnen op 0.6; 1.85 en 3.75 m hoogte.

Afstand tot de weg in m.	**Som van drie bronnen**			
	Z = 1.5 m	Z = 4 m	Z = 8 m	Z = 16 m
0	5.9	3.6	1.4	0.2
4	4.9	3.4	1.6	0.3
8	4.1	3.1	1.7	0.4
16	2.9	2.4	1.7	0.7
32	1.5	1.4	1.2	0.8
64	0.3	0.3	0.3	0.3
		1 bron		
0	3.4	2.8	1.9	0.7
4	3.1	2.6	1.9	0.8
8	2.6	2.3	1.7	0.9
16	2.0	1.8	1.5	0.9
32	1.0	1.0	0.9	0.7
64	0.2	0.2	0.2	0.2

Met deze aanpak hebben we echter een probleem! De depositie van aërosol vindt plaats ten aanzien van de hele aërosolconcentratie. Daarmee wordt bij flinke depositiefluxen (groot vangend oppervlak) de depositieflux al snel groter dan de flux ten gevolge van de verkeersbijdrage en krijgen we negatieve bronsterkten. Om dit te ondervangen wordt de achtergrondflux ter hoogte van de virtuele bron door de betreffende laag (Achtergrond-concentratie maal integraal van de windsnelheid in de hoogte) bij de bronsterkte door het verkeer opgeteld. De bronsterkte wordt vervolgens verminderd met de depositie. Op het moment, dat de bronsterkte minus de depositieflux voor het laagste niveau (0-1.2 m) negatief wordt, wordt de bronsterkte op nul gezet. De resterende depositieflux wordt nu van de middelste bron afgetrokken. Als de depositieflux zo groot is, dat ook de middelste bronsterkte negatief dreigt te worden wordt de bronsterkte wederom op nul gezet en de resterende flux van de sterkte van de hoogste bron afgetrokken. Deze procedure heeft het voordeel boven evenredige bronsterkte vermindering van de flux op alle drie niveaus, dat een door depositie beïnvloed concentratieprofiel wordt verkregen.
Voor een weg zonder scherm (referentie) wordt z= 5 m en Dep=0 gehanteerd.

De berekende virtuele bronafstanden vermeerderd met de halve breedte van de weg (= 8m) worden weergegeven in tabel 7.

Tabel 7 Berekende virtuele bronafstanden (x_0) voor een vierstrooks snelweg voor neutrale en stabiele condities. Als initiële menghoogte midden boven de weg is 5 m aangenomen. Voor de dikte van de laag, waarin depositie een rol speelt is 1.2 m aangenomen.

	Geen scherm			**Wel scherm**		
Laag	Onder	Midden	Boven	Onder	Midden	Boven
Neutraal	4.6	15.0	69.5	1.3	8.2	49.0
stabiel	4.6	15.0	71.3	1.2	8.2	50.9

Op basis van de virtuele bronafstanden (vermeerderd met de halve breedte van de weg (8 m) en de afstand van het rekenpunt tot de weg) en hoogten en de daarbij behorende lijnbronsterkte kunnen nu verspreidingberekeningen worden uitgevoerd volgens het K-model van Gryning (Gryning et al, 1985).
Dit model kan geen rekening houden met het scherm. Uitgangspunt is derhalve, dat de berekende concentraties achter het scherm gelijk zijn aan die zonder scherm. Door het hanteren van drie bronhoogten en het optellen van de concentraties van iedere bron en de achtergrond wordt een schatting gekregen van de concentratieverdeling.

$$C_{x,z} = C_{x,z;L} + C_{x,z;M} + C_{x,z:H} + C_A$$

Met $C_{x,z}$ = totale concentratie op afstand x en hoogte z ($\mu g\ m^{-3}$)
$C_{x,z;L}$ = concentratie berekend uit de depositie gecorrigeerde lage bron ($\mu g\ m^{-3}$)
$C_{x,z;M}$ = concentratie berekend uit de bronsterkte voor de e.v.t. voor depositie gecorrigeerde middelste bron ($\mu g\ m^{-3}$)
$C_{x,z;H}$ = concentratie berekend uit de bronsterkte voor de e.v.t. voor depositie gecorrigeerde hoogste bron ($\mu g\ m^{-3}$)
C_A = concentratie van de achtergrond

De berekening, die op deze wijze wordt uitgevoerd is een zo nauwkeurig mogelijke schatting op basis van beperkte middelen. Er bestaan hiervoor meer geschikte modellen, die wel rekening houden met obstakelstromingen, doch inzet van die modellen valt buiten het bestek van dit rapport.

Omdat de verspreiding van verontreiniging dicht bij de grond minder effectief is dan hoger in de atmosfeer (door demping van de turbulentie aan de grond), wordt voor elk meetpunt de effectieve pluimhoogte bepaald uit (Gryning et al,1985);

$$x + x_0 = \frac{\bar{z}}{k^2}.\left[\ln\left(\frac{c.\bar{z}}{z_0}\right) - \psi_h\left(\frac{c.\bar{z}}{L}\right)\right].\left[1 - \frac{a_1 p \bar{z}}{4L}\right]^{-1/2} \quad \text{voor L} < 0$$

en

$$x + x_0 = \frac{\bar{z}}{k^2}.\left[\ln\left(\frac{c.\bar{z}}{z_0}\right) + \frac{2b_2 p\bar{z}}{3L}\right].\left[1 + \frac{b_1 p\bar{z}}{2L}\right] + \left(\frac{b_1}{4} - \frac{b_2}{6}\right).p.\frac{\bar{z}}{L} \quad \text{voor L} > 0$$

Met; x = afstand tot het midden van de weg (m) c = constante (0.6)
x_0 = virtuele bronafstand (m) p = constante (1.55)
a_1 = constante (16)
b_1 = constante (-0.577191652)
b_2 = constante (0.988205891)

Waarden voor de gemiddelde pluimhoogte voor de onderscheiden lijnbronnen zijn weergegeven in tabel 8.

Tabel 8 Waarden voor de gemiddelde pluimhoogte en windsnelheid op die hoogte voor ongestoorde verspreiding vanaf een weg, voor de laag, waaruit depositie plaats vindt en de niet beïnvloede gemengde laag boven de weg voor de afstanden 4 m; 8 m; 16 m; 32 m en 64 m achter het scherm. Voor de berekeningen wordt een ruwheidslengte van z_0 = 0.1 m voor een weg zonder schermen gehanteerd en 0.25 m voor een weg met schermen.

	Geen scherm (z_0 = 0.1 m)						**Met scherm (z_0 = 0.25 m)**					
	L laag		M laag		H laag		L laag		M laag		H laag	
Neutraal	z_{gem} (m)	U_{gem} (m s^{-1})	z_{gem} (m)	U_{gem} (m s^{-1})	z_{gem} (m)	U_{gem} (m s^{-1})	z_{gem} (m)	U_{gem} (m s^{-1})	z_{gem} (m)	U_{gem} (m s^{-1})	z_{gem} (m)	U_{gem} (m s^{-1})
0 m	1.1	1.8	1.7	2.3	3.7	3.0	1.3	1.4	1.8	1.8	4.2	2.9
4 m	1.3	2.0	1.9	2.4	4.2	3.2	1.6	1.7	2.1	2.0	4.4	3.0
8 m	1.5	2.1	2.1	2.5	4.4	3.2	1.9	1.9	2.3	2.1	4.6	3.0
16	1.9	2.4	2.5	2.6	4.7	3.3	2.4	2.2	2.8	2.4	5	3.1
32	2.7	2.7	3.1	2.9	5.3	3.4	3.3	2.6	3.7	2.7	5.7	3.3
64	4	3.1	4.4	3.2	6.5	3.6	5	3.1	5.3	3.2	7.2	3.6
Stabiel												
0 m	0.9	0.4	1.7	0.5	4.5	0.8	1.3	0.3	1.8	0.4	4.4	0.7
4 m	1.2	0.5	1.9	0.6	4.7	0.8	1.6	0.4	2.1	0.5	4.6	0.8
8 m	1.4	0.5	2.1	0.6	4.9	0.8	1.9	0.5	2.3	0.5	4.9	0.8
16	1.8	0.6	2.5	0.6	5.3	0.9	2.4	0.5	2.8	0.6	5.3	0.8
32	2.6	0.7	3.3	0.7	6.1	0.9	3.4	0.6	3.8	0.7	6.4	0.9
64	4.2	0.8	4.8	0.8	8	1.0	5.3	0.8	5.7	0.8	8.6	1.0

De stabiliteitscorrectie Ψ wordt verkregen uit ;

$$\psi_h = \psi_m^2 = \left(\phi_m^{-1} - 1\right)^2 \text{ voor L} < 0$$

$$\psi_h = \psi_m = -b_2 z / L \text{ voor L} > 0$$

met ;

$$\phi_h = \left(1 - a_1 z / L\right)^{-1/2} \text{ en } \phi_h = \left(1 - a_2 z / L\right)^{-1/4} \text{ voor L} < 0$$

en

$$\phi_h = 1 + b_1 z / L \text{ en } \phi_m = 1 + b_2 z / L \text{ voor L} > 0$$

Voor de verspreidingberekeningen nemen we een logarithmisch windprofiel aan. De windsnelheid op de gemiddelde pluimhoogte wordt berekend met;

$$\bar{u} = \frac{u^*}{k}\left(\ln\left(\frac{c.\bar{z}}{z_0}\right) - \psi_h\left(\frac{c.\bar{z}}{L}\right)\right) \text{ voor L} < 0$$

en

$$\bar{u} = \frac{u^*}{k}\left(\ln\left(\frac{c.\bar{z}}{z_0}\right) + \left(\frac{b_2.\bar{z}}{L}\right)\right) \text{ voor L} > 0$$

De resultaten zijn opgenomen in tabel 8.
De concentratie als functie van de hoogte wordt verkregen uit;

$$C_y(z) = \frac{q.A}{\bar{z}.u}.\exp\left[-\left(\frac{B.z}{\bar{z}}\right)^s\right]$$

met; q = lijnbronsterkte (μg m^{-1} s^{-1})
A = coëfficiënt afhankelijk van vorm factor s
B = coëfficiënt afhankelijk van vorm factor s

De vormfactor s wordt verkregen uit;

$$s = \frac{1 - a_1.c.\bar{z}/2L}{1 - a_1.c.\bar{z}/L} + \frac{\left(1 - a_2.c.\bar{z}/L\right)^{-1/4}}{\ln\left(\frac{c.\bar{z}}{z_0}\right) - \psi_h\left(c.\bar{z}/L\right)} \text{ for L} < 0$$

en

$$s = \frac{1 + 2b_2.c.\bar{z}/L}{1 + b_1.c.\bar{z}/L} + \frac{\left(1 + b_2.c.\bar{z}/L\right)}{\ln\left(\frac{c.\bar{z}}{z_0}\right) + b_2.c.\bar{z}/L} \quad \text{for L} > 0$$

De coëfficiënten zijn gelijk aan die, welke voor berekening van de virtuele bronafstand zijn gebruikt.
A wordt berekend uit;

$$A = \frac{s.\Gamma(2/s)}{(\Gamma(1/s))^2}$$

B volgt uit;

$$B = \frac{\Gamma(2/s)}{\Gamma(1/s)}$$

De Γ functie wordt gedefinieerd door;

$$\Gamma(p) = 1 + \sum_{n=1}^{8} b_n.(p-1)^n \quad \text{met } 1 \le p \le 2$$

Met de coëfficiënten A en B kunnen de concentraties bij ongestoorde verspreiding op verschillende afstanden en hoogten worden berekend.

Omdat de achtergrondflux bij de verkeersflux is opgeteld om na correctie voor depositie geen negatieve bronsterkte te krijgen is de bronsterkte kunstmatig verhoogd. Hiervoor kan worden gecorrigeerd door de bronsterkte te verlagen. Dit kan door te stellen, dat de berekende gemiddelde concentratie op een afstand van 0 m (op 1.5 en 4 m hoogte) van de weg gelijk moet zijn aan de berekende concentratie t.g.v. het wegverkeer na correctie voor depositie. Op deze wijze wordt een broncorrectiefactor verkregen. Na gebruik van die correctiefactor komen de op basis van emissie en depositie berekende concentraties in de tot 5 m opgemengde luchtmassa boven de weg gemiddeld overeen met de door het model berekende concentraties.

De verspreiding is met de plaatsing van een scherm echter niet ongestoord. De invloed op het concentratieprofiel met de hoogte wordt gering in geschat, omdat het profiel dicht bij de grond vrij constant is. Er is echter wel extra inmenging van achtergrondlucht door het scherm. Dit brengt een extra verlaging van de concentraties te weeg. Deze bijdrage aan verlaging van de concentraties kan alleen empirisch worden ingeschat. Dit gebeurt op basis van het BAST rapport (Esser en Hasskelo, 2000) op de volgende wijze;

- Er wordt aangenomen dat de verhouding tussen verkeersbijdrage en achtergrondconcentratie in onze situatie vergelijkbaar is met die in de BAST studie. Was

deze verhouding wel bekend geweest, dan kon daaruit de ingemengde hoeveelheid achtergrondlucht met bekende concentratie worden ingeschat. De verhouding tussen concentratie bepaalt door de verkeersbijdrage plus achtergrond en de hoeveelheid bijgemende lucht met achtergrond bepaald dan de concentratieverlaging door extra turbulentie. De invloed van extra turbulentie op de concentratie wordt zo plaatsafhankelijk. Bij gebrek aan deze gegevens wordt dezelfde percentuele verlaging van de concentratie door extra turbulentie aangehouden als in de BAST studie.

- De BAST studie geeft een verlaging door schermwerking van de concentratie aan van 5-25%. Voor deze studie is gekozen voor verlaging van de totale concentratie met 20% voor neutrale meteorologische condities en 5 % onder stabiele condities. Motivatie is, dat de extra menging onder omstandigheden met weinig wind ook minder zal zijn.
- Er wordt geen rekening gehouden met door BAST vermelde verhoogde concentraties dicht bij het scherm. Overigens blijkt door toepassing van een andere ruwheidslengte voor een weg met scherm en een weg zonder scherm, dat de verhoging vlak bij het scherm ook in deze rekenmethode optreedt.

Voor de overzichtelijkheid worden enkele resultaten van de berekeningen gepresenteerd in de vorm van figuren in hoofdstuk 7. De berekende waarden in de vorm van concentraties in de lucht, verandering in concentratie ten opzichte van een weg zonder scherm en ten opzichte van een kaal scherm zijn weergegeven in bijlage 2. De laatste tabellen zijn toegevoegd om het effect van beplanting ten opzichte van een kaal scherm te laten zien. Bij vergelijking met een vrij liggende weg speelt het verschil in ruwheid een rol in de resultaten en kan dat effect niet van het vegetatie effect worden gescheiden.

Een 50 meter brede strook vegetatie achter een scherm

De voorgaande berekeningen tonen een belangrijk effect van vegetatie op- of voor een scherm op de luchtkwaliteit erachter. Onder stabiele atmosferische condities is dit gunstige effect voldoende om fijn stof concentraties lager dan 50 $\mu g\ m^3$ te bereiken. Voor een kaal scherm is alleen voldoende afstand (meer dan 25 m) hier effectief. Het ruimte beslag van een isolatiestrook zou wellicht kunnen worden benut voor het aanbrengen van vegetatie (is oppervlak voor depositie) in die strook. Verwachting is, dat door het grote oppervlak concentraties in de lucht aanmerkelijk zullen dalen. Dit is gunstig i.v.m. het ontbreken van een no-effect level. Om dit te exploreren wordt het effect van een 50 meter brede strook geoptimaliseerde vegetatie doorgerekend.

Bij aanname van een maximale Leaf Area Index van omstreeks 10 in natuurlijke omstandigheden is het bladoppervlak per m^{-3} lucht binnen de vegetatie voor een strook van 1 m breedte gelijk aan (50*10)/ (20*50) = 0.5 m^2. Aan de zijden van de vegetatie is er echter ook lichtinval. Stel dat daar een zelfde doving van het licht plaats vindt door de vegetatie als van boven naar beneden (met een maximale zonnehoek van 52 ^{o} geen onredelijke gedachte). Er komt dan aan beide zijden een

strook van 20 m bij met 0.5 m^2 per m^3. Het gemiddelde bladoppervlak per m^3 wordt dan gelijk aan {(50*20)+(40*20)}*0.5/50*20 = 0.9 m^2 m^{-3}.
De rekenprocedure loopt parallel aan de situatie van een met klimplanten begroeid scherm met een bron in de oppervlaktelaag en een bron in de gemengde laag. De depositie van fijn stof op het begroeide scherm wordt op dezelfde wijze als voorheen uitgerekend. Deze procedure kan niet worden toegepast voor de depositie in de groenstrook, omdat de aanname van geringe invloed van de depositie op de concentratie niet meer op gaat.
De invloed van de depositie op de concentratie wordt nu geschat uit;

$$C_{x,d} = C_{x,0}.e^{-v_d.0.9.x}$$

Daarbij is; $C_{x,0}$ = Concentratie op x m achter het met klimop begroeide scherm (μg m^{-3}) zonder depositie in de groenstrook
$C_{x,d}$ = Concentratie op afstand x met correctie voor depositie (μg m^{-3})
v_d = depositie snelheid (0.02891 m s^{-1} neutraal resp. 0.0108 m s^{-1} stabiel)
0.9 = specifiek oppervlak per m^3 (m^2 m^{-3})
x = afstand tot het scherm (m)

Na berekening van de concentraties moet achter het scherm worden gecorrigeerd voor de extra turbulentie gegenereerd door scherm en groenstrook.
Gaan we uit van de generatie van wervels, die qua grootte evenredig zijn met de obstakelhoogte en een energie-inhoud, die quadratisch is met de wervelgrootte, dan zou de turbulentie ten opzichte van een 4 m hoog scherm met een factor $(20/4)^2 = 25$ toenemen. Omdat de extra turbulentie in voorwaartse en zijdelingse richting bij een lijnbron niet bijdraagt aan extra verdunning, wordt er van uitgegaan, dat de extra verticale inmenging evenredig is met de derde machtswortel uit deze extra energie-inhoud (1.7). Voor het 4 m hoge scherm in de BAST studie nam de verdunning met 20% toe voor neutrale condities, terwijl de toename voor stabiele condities op 5% werd geschat. Op deze wijze geschat komt de extra verdunning in het geval van een groenstrook neer op 34% voor neutrale condities en 8.5% voor stabiele condities. Dit zal gelden voor de concentraties achter de groenstrook (dus op 64 m van de weg). Voor de groenstrook zelf wordt geen correctie toegepast, omdat de turbulentie in de strook wordt gedempt. Opgemerkt moet worden, dat deze extra verdunning met lucht van boven tot een stijging van de concentraties aanleiding geeft vanaf 50 m afstand, omdat de bovenlucht minimaal de achtergrondconcentratie bevat en de concentraties bij doorgang door een efficiënte groenstrook door depositie lager worden dan de achtergrond.

Gebruik van een luchtscherm op een geluidsscherm van 4 m hoogte.
Door gebrek aan praktijkmetingen is de werking van een luchtscherm evenals voor de eerder beschreven situaties alleen theoretisch en onder een aantal aannamen te schatten.

De eerste aanname is, dat de invloed van het luchtscherm niet verder reikt dan 1.5 m boven het scherm onder neutrale condities en 3.0 m onder stabiele omstandigheden (kwadratische afname van de snelheid met de afstand tot het scherm). De bijdrage aan verhoging van de turbulentie intensiteit wordt geheel toegeschreven aan de virtuele verhoging van het scherm.
Omdat alleen de verticale inmenging van belang is wordt analoog aan het groenscherm een verdunningsfactor geschat, die gelijk is aan;

$$f_{verdun} = \left\{ (4 + \Delta h)^2 \Big/ 4^2 \right\}^{0.33}$$

Deze verdunning sterft uit met het uitsterven van de turbulentie. Aannamen zijn hier dat de extra turbulentie uitsterft op een afstand die tweemaal zo groot is als de afstand waarop het windsnelheidsprofiel weer de oude vorm benaderd (20 H). De verdunningsfactor verloopt daarmee van de berekende waarde bij het luchtscherm tot een waarde van 1 op een afstand 40 H. Op gelijke wijze wordt voor het uitsterven in de hoogte een dempingsafstand van 3H aangenomen.
De berekende waarde wordt dan verkregen door de berekende concentraties in de lucht voor een kaal scherm te vermenigvuldigen met de verdunningsfactor op de volgende wijze;

$$C_{(luchtscherm,x,z)} = C_{(kaal,x,z)} * \left\{ 1 + \left(f_{verdun} - 1 \right) * \frac{(40H - x)}{40H} * \frac{(3H - z)}{3H} \right\}$$

Condities zijn; $0 < x < 40H$ en $H < z < 3H$
Voor $z < H$ en $z > 3H$ wordt de term $(3H-z)/3H$ gelijk gesteld aan 1
Voor $x > 40$ H wordt de term $(40H-x)/40H$ gelijk gesteld aan 1
Er wordt uitgegaan van de drie gebruikelijke bron hoogtes. De depositie op een kaal scherm (2-4%) wordt in rekening gebracht.
De resulterende concentratieverlaging door schijnbare verhoging van het scherm bedraagt 6-7% dicht achter het scherm, aflopend tot 0-1 % voor de grootste afstanden en grootste hoogtes voor gemiddeld neutrale condities. Voor stabiele condities is dat 28-36% vlak achter het scherm met luchtscherm, eveneens aflopend tot enkele procenten op grotere hoogten en grotere afstanden. Dit hogere resultaat voor stabiele condities wordt verklaard door de geringere atmosferische windsnelheid en turbulentie in die situatie, waardoor de grotere effectieve verhoging van het scherm meer effect oplevert. Geen rekening is gehouden met de omstandigheid, dat het wegvallen van de wind wel eens roet in het eten kan gooien door geen extra turbulentie meer te leveren. Door gebrek aan gegevens is het belang van dit aspect niet goed in te schatten.

Bijlage 2 Berekende concentraties en percentuele reducties voor situaties zonder scherm, met een kaal scherm en schermen diverse soorten begroeiing.

Tabel 8 Berekende fijn stof concentraties (μg m^{-3}) naast een vierstrooks snelweg met 100.000 voertuigen per etmaal en 14% vrachtverkeer voor gemiddeld neutrale condities. Als achtergrondconcentratie is 20 μg m^{-3} aangenomen.

	Geen scherm				Kaal scherm			
Afstand	Hoogte 1.5	4 m	8 m	16 m	1.5 m	4 m	8 m	16 m
0 m	26	24	21	20	27	25	24	23
4 m	25	23	22	20	26	24	23	23
8 m	24	23	22	20	26	24	23	22
16 m	23	22	22	21	25	24	23	22
32 m	21	21	21	21	23	23	22	22
64 m	20	20	20	20	22	22	22	21
	Scherm +klimop				Poreus scherm + klimop			
Afstand	Hoogte 1.5	4 m	8 m	16 m	1.5 m	4 m	8 m	16 m
0 m	22	22	21	21	15	16	18	20
4 m	22	21	21	21	16	17	18	19
8 m	21	21	21	21	17	17	18	19
16 m	21	21	21	21	17	17	18	19
32 m	21	21	21	21	18	18	18	19
64 m	21	21	21	20	18	19	19	19
	Poreus scherm + klimop +voorscherm							
Afstand	Hoogte 1.5	4 m	8 m	16 m				
0 m	11	13	16	19				
4 m	13	14	16	19				
8 m	13	14	16	19				
16 m	14	15	16	19				
32 m	15	16	17	18				
64 m	17	17	18	18				

Tabel 9 Berekende fijn stof concentraties (μg m^{-3}) naast een vierstrooks snelweg met 100.000 voertuigen per etmaal en 14% vrachtverkeer voor stabiele condities. Als achtergrondconcentratie is 35 μg m^{-3} aangenomen.

	Geen scherm				Kaal scherm			
Afstand	Hoogte 1.5	4 m	8 m	16 m	1.5 m	4 m	8 m	16 m
0m	68	37	35	35	67	48	41	36
4 m	61	40	35	35	62	49	41	36
8 m	57	42	35	35	59	49	41	36
16 m	51	43	36	35	55	49	41	37
32 m	44	42	37	35	49	47	42	37
64 m	40	40	38	35	43	43	41	38
	Scherm +klimop				Poreus scherm + klimop			
Afstand	Hoogte 1.5	4 m	8 m	16 m	1.5 m	4 m	8 m	16 m
0m	46	43	39	36	22	23	27	33
4 m	45	43	39	36	23	24	27	33
8 m	44	42	39	36	24	25	27	33
16 m	43	42	39	36	25	26	27	33
32 m	41	40	39	36	27	27	28	32
64 m	39	39	38	37	29	29	30	32
	Poreus scherm + klimop +voorscherm							
Afstand	Hoogte 1.5	4 m	8 m	16 m				
0m	9	11	18	32				
4 m	10	12	18	31				
8 m	12	13	18	31				
16 m	15	16	19	30				
32 m	18	19	21	29				
64 m	23	23	24	28				

Tabel 10 Percentuele verandering van de concentraties achter verschillende typen schermen ten opzicht van de concentraties achter een kaal scherm voor gemiddeld neutrale condities.

	Kaal scherm				Scherm+klimop			
Afstand	Hoogte 1.5	4 m	8 m	16 m	1.5 m	4 m	8 m	16 m
0 m	0	0	0	0	-15.9	-10.5	-8.2	-6.5
4 m	0	0	0	0	-14.5	-10.2	-8.0	-6.5
8 m	0	0	0	0	-13.4	-9.8	-7.5	-6.1
16 m	0	0	0	0	-11.6	-9.0	-6.8	-5.3
32 m	0	0	0	0	-8.9	-7.7	-6.0	-4.5
64 m	0	0	0	0	-5.6	-5.2	-4.5	-3.4
	Poreus scherm + klimop				Poreus scherm + klimop +voorscherm			
Afstand	Hoogte 1.5	4 m	8 m	16 m	1.5 m	4 m	8 m	16 m
0 m	-36.1	-28.0	-19.7	-11.3	-49.7	-39.4	-26.4	-12.7
4 m	-31.4	-25.3	-19.0	-11.6	-42.8	-35.2	-25.6	-13.8
8 m	-29.2	-24.1	-18.2	-11.3	-39.9	-33.4	-24.7	-13.7
16 m	-25.9	-22.0	-16.8	-10.6	-35.7	-30.7	-23.2	-13.3
32 m	-20.7	-18.5	-14.9	-9.9	-28.8	-25.8	-20.7	-13.0
64 m	-13.6	-12.8	-11.2	-8.3	-19.1	-17.9	-15.7	-11.5

Tabel 11 Percentuele verandering van de concentraties achter verschillende typen schermen ten opzicht van de concentraties achter een kaal scherm voor stabiele condities.

	Kaal scherm				Scherm+klimop			
Afstand	Hoogte 1.5	4 m	8 m	16 m	1.5 m	4 m	8 m	16 m
0 m	0	0	0	0	-30.3	-10.3	-3.0	-0.6
4 m	0	0	0	0	-26.8	-12.7	-3.3	-0.6
8 m	0	0	0	0	-24.7	-13.6	-3.7	-0.7
16 m	0	0	0	0	-21.0	-14.0	-4.7	-0.9
32 m	0	0	0	0	-15.5	-12.6	-6.6	-1.2
64 m	0	0	0	0	-9.4	-8.8	-7.0	-2.3
	Poreus scherm + klimop				Poreus scherm + klimop +voorscherm			
Afstand	Hoogte 1.5	4 m	8 m	16 m	1.5 m	4 m	8 m	16 m
0 m	-64.9	-49.6	-32.6	-6.7	-84.7	-74.8	-46.6	-9.6
4 m	-61.0	-49.3	-32.5	-7.7	-80.8	-72.6	-46.2	-11.0
8 m	-57.8	-48.3	-32.5	-8.5	-77.3	-70.3	-45.9	-12.3
16 m	-52.1	-45.7	-32.6	-10.1	-70.7	-65.6	-45.3	-14.6
32 m	-42.9	-40.0	-32.2	-12.5	-59.8	-57.2	-43.6	-17.9
64 m	-30.8	-30.2	-27.8	-15.7	-44.5	-43.8	-36.9	-21.8

Tabel 12 Concentraties aan fijn stof voor een vierstrooks snelweg met en verkeersdichtheid van 100.000 voertuigen per etmaal achter een kaal geluidsscherm en een geluidsscherm met luchtscherm, dat tot 1.5 m boven het geluidsscherm reikt. De percentuele reductie staat tussen haakjes aangegeven. Neutrale atmosferische condities.

	Kaal scherm 4 m hoog				Scherm met luchtscherm (4 + 1.5 m)			
Afstand	Hgt 1.5	4 m	8 m	16 m	Hoogte 1.5	4 m	8 m	16 m
0 m	28	25	24	23	26 (-7%)	24 (-5%)	24 (-1%)	23 (0%)
4 m	27	25	24	23	25 (-6%)	24 (-5%)	23 (-1%)	23 (0%)
8 m	26	24	23	23	25 (-5%)	23 (-4%)	23 (-1%)	23 (0%)
16 m	25	24	23	22	24 (-4%)	23 (-4%)	23 (-1%)	22 (0%)
32 m	24	23	23	22	23 (-3%)	23 (-3%)	22 (-1%)	22 (0%)
64 m	22	22	22	21	22 (-1%)	22 (-1%)	22 (0%)	21 (0%)

Tabel 13 Concentraties aan fijn stof voor een vierstrooks snelweg met en verkeersdichtheid van 100.000 voertuigen per etmaal achter een kaal geluidsscherm en een geluidsscherm met luchtscherm, dat tot 3.0 m boven het geluidsscherm reikt. De percentuele reductie staat tussen haakjes aangegeven. Stabiele atmosferische condities.

	Kaal scherm 4 m hoog				Scherm met luchtscherm (4 + 3.0 m)			
Afstand	Hgt 1.5	4 m	8 m	16 m	Hoogte 1.5	4 m	8 m	16 m
0 m	68	49	41	36	53 (-28%)	42 (-14%)	40 (-2%)	36 (0%)
4 m	63	50	41	36	51 (-25%)	43 (-15%)	40 (-2%)	36 (0%)
8 m	60	50	41	36	49 (-22%)	43 (-15%)	40 (-2%)	36 (0%)
16 m	56	49	42	37	47 (-18%)	44 (-13%)	41 (-2%)	37 (0%)
32 m	49	47	42	37	44 (-12%)	43 (-10%)	41 (-2%)	37 (0%)
64 m	43	43	42	38	41 (-6%)	41 (-5%)	41 (-1%)	38 (0%)