

# Luchtkwaliteit in een complexe gebouwde omgeving

*Reeds in eerdere nummers van het blad Lucht in 1997 en in 1998<sup>1, 2</sup>, wordt melding gemaakt van het ontbreken van betrouwbare (reken)modellen voor het voorspellen van de luchtkwaliteit in complex gebouwde omgevingen, met woningen op zeer korte afstand van (snel)wegen.*

Ferry Koopmans en Stephan van den Akker

In Nederland is de beschikbare ruimte relatief beperkt, waardoor wonen, werken en infrastructuur noodzakelijkerwijze zo dicht mogelijk bij elkaar worden gesitueerd. Dit kan evenwel tot een onevenredige aantasting van woon- en leefkwaliteit leiden waarbij geluidsoverlast en aantasting van de luchtkwaliteit een belangrijke rol spelen. In een aantal situaties worden juist woningen gebruikt om achtergelegen gebieden te vrijwaren van geluidsoverlast, zogenaamde geluidschermwoningen, maar juist ter plaatse van deze woningen kunnen hoge luchtverontreinigingsconcentraties optreden. In verband met de geschetste problematiek, ook wel aangeduid als "de problematiek van de compacte stad" bestaat de noodzaak tot een goede afstemming van de plannen waarbij gebruik wordt gemaakt van adequate (beleids)instrumenten.

Bestaande beschikbare (reken)modellen, zoals het CAR-model, kennen te grote beperkingen en zijn niet bruikbaar. Inmiddels worden door diverse partijen plannen gepresenteerd waarbij woningen op of naast verkeerstunnelmondingen, dichtbij snelwegen (denk daarbij ook aan de bovengenoemde geluidschermwoningen), en niet ver van kruispunten, worden gepland. Het mag bekend worden verondersteld dat gebouwen een grote invloed op de verspreiding van luchtverontreiniging kunnen hebben. Stroomafwaarts van de wind, treedt achter een gebouw een zog op (lijzijde)wervels) dat qua omvang en effecten afhankelijk is van de grootte en vorm van een gebouw. In de lijzijde)wervels, waarin een luchtverontreiniging kan worden opgenomen, kunnen door de specifieke stromingseffecten hoge concentraties optreden.

Er kan sprake zijn van een plaatselijk sterk verminderde luchtkwaliteit; dat dit ongewenst is spreekt voor zich. De vraag is evenwel of dergelijke situaties zich op een relatief eenvoudige

(onderzoeks)wijze laten voorspellen en of middels een adequate planvorming een acceptabele situatie bereikt kan worden.

Waar de beschikbare rekenmodellen te kort schieten in het verdisconteren van de gebouwinvloeden en het voorspellen van toekomstige situaties, kan wel gebruik worden gemaakt van proeven op schaal in een atmosferische grenslaagtunnel, waarbij gebruik wordt gemaakt van tracergas. Middels windtunnelmetingen kan de invloed van bebouwing op de verspreiding van luchtverontreiniging naar de omgeving relatief eenvoudig en goed in kaart worden gebracht.

Op grond van het windtunnelonderzoek wordt voor de verschillende windrichtingen de verdunningsrelatie van de bronnen naar de omgeving vastgesteld. Indien deze verdunningsrelaties bekend zijn, kan op grond van verkeers(emissie)gegevens, de relevante uur bij uur meteorostatistiek, en de modellering van omzettingen in de lucht conform het Nieuw Nationaal Model de luchtkwaliteit in de omgeving van bronnen worden bepaald. Daarbij kunnen zowel gemiddelde immissiewaarden als percentielwaarden worden berekend. Uitgaande van prognoses met betrekking tot de ontwikkelingen van auto's (o.m. emissiebeperkende maatregelen) en verkeersintensiteiten kunnen tevens voorspellingen aangaande de toekomstige luchtkwaliteit worden gemaakt. Indien (betrouwbare) gegevens beschikbaar zijn met betrekking tot de geuremissie van auto's kunnen op deze wijze eveneens de te verwachten geurimmissieconcentraties in de (woon)omgeving worden bepaald.

De toepassing van een dergelijke methodiek is zoveel betrouwbaarder dan de toepassing van rekenmodellen, daar nu juist de invloed van gebouwen op de verspreiding van luchtverontreiniging op deze wijze adequater en meer realistisch in beeld kan worden gebracht. Dit artikel doet verslag van een onderzoek naar relevante situaties waarbij sprake is van een complex gebouwde omgeving waarbij gezocht wordt naar oplossingen c.q. het formuleren van adequate (hoogte- en afstands-)eisen zodanig dat na realisering van (infrastructuur en bouw)plannen sprake is van een aanvaardbare luchtkwaliteit in woon- en leefomgeving.

## Huidige rekenmodellen

De huidige generatie rekenmodellen, zoals het oude en het nieuwe nationale model (NM 1/2) en het CAR-model, zijn gebaseerd op het principe van de vrije pluimspreiding, geldig voor emissies van schoorstenen in het vrije veld. De rekenresultaten zijn betrouwbaar vanaf ca. 100 meter van de bron.

Een aantal rekenmodellen bevat ook een module voor het verdisconteren van gebouwinvloeden. Er dient dan wel sprake te zijn van een eenvoudige geometrie (bijvoorbeeld aaneengesloten, ononderbroken bebouwing of een enkel blokvormig gebouw). Voor de effecten van deze gebouwinvloeden op de verspreiding van stoffen in de lucht zijn eenvoudige vuistregels afgeleid uit windtunnelonderzoek.

Ir J.F.W. Koopmans is werkzaam als raadgevend ingenieur en tevens directielid bij Adviesbureau Peutz & Associés, Ir. S.P.M. van den Akker is bij Peutz werkzaam als projectleider. Op de lezingendag van de toenmalige Vereniging Lucht in 1997 deden zij reeds eerder verslag van relevante onderzoeksresultaten. Postbus 66, 6585 ZH Mook. Telefoon: 024 3880077. E-mail: mook@peutz.nl.

## Gebouwinvloeden

Juist in de inleiding geschetste kritische situaties is echter vaak sprake van een complexe gebouwde omgeving. Deze situaties zijn niet goed te vatten in eenvoudige vuistregels. Het verspreidingsproces van luchtverontreiniging verschilt essentieel van vrije pluimspreiding. Concreet kunnen de navolgende verschillen worden genoemd:

- De turbulentie is sterk vergroot ten gevolge van wervels rondom gebouwen. Turbulentie zoals bijvoorbeeld wordt afgeleid uit een stabiliteitsklassen-indeling van de atmosfeer (NM 1), of de gemeten turbulentie in het vrije veld (NM 2) zijn niet representatief voor de beschouwde situatie;
- Lokaal kunnen lage windsnelheden optreden, waardoor weinig luchtverversing en verdunning optreedt;
- Het traject van pluim wordt sterk beïnvloed door lokale onder- en overdrukgebieden bij gebouwen. Onder bepaalde omstandigheden is het bijvoorbeeld mogelijk dat over aanzienlijke afstanden tegenwinds transport van luchtverontreiniging optreedt.

Het mag duidelijk zijn dat het blindelings toepassen van eenvoudige rekenmodellen in dergelijke omstandigheden tot aanzienlijke fouten kan leiden. Het verrichten van metingen in een atmosferische grenslaag-windtunnel is dan een zinvol alternatief.

## De atmosferische grenslaagtunnel

In een windtunnel kan een complexe gebouwde omgeving op schaal worden nagebouwd. In het schaalmodel (maquette) worden de aanwezige bronnen van luchtverontreiniging nagebootst met tracergasbronnen (elektronisch meetbaar gas, zoals iso-buteen). De maquette wordt op een draaischijf gemonteerd teneinde voor alle relevante windrichtingen metingen te kunnen verrichten.

T.b.v. betrouwbare metingen is met name het windsnelheidsverloop in de hoogte van belang; met noemt dit snelheidsverloop met de hoogte gewoonlijk het windprofiel. Het windprofiel is in hoofdzaak afhankelijk van twee factoren:

- de algemene ruwheid van het bovenwindse aanstroomgebied;
- het verloop van de luchttemperatuur met de hoogte (temperatuurprofiel).

Indien ervan uitgegaan wordt dat het temperatuurprofiel zodanig is dat door thermische effecten geen noemenswaardige uitwisseling van windsnelheden op verschillende hoogtes plaatsvindt (d.w.z. neutrale stabiliteit van de grenslaag; hiervan is sprake bij windsnelheden vanaf globaal windkracht 3 à 4), dan blijft de ruwheid van het bovenwindse aanstroomgebied als belangrijkste parameter over.

In een atmosferische grenslaagtunnel wordt de grenslaagstroming die in de praktijk (bij neutrale stabiliteit t.a.v. het temperatuurprofiel) aanwezig is, op schaal opgewekt, zodat ter plaatse van het meetobject het juiste windprofiel wordt aangeboden.

Teneinde het in het model gemeten verband tussen de uitstoot van tracergas en de nabij de meetpunten optredende concentraties ten gevolge van deze uitstoot op eenvoudige wijze te kunnen relateren aan de in de werkelijkheid te verwachten concentraties wordt gerekend met behulp van uit metingen in de windtunnel vast te stellen concentratiecoëfficiënten. Voor de concentratiecoëfficiënt  $K$  geldt het volgende verband:

$$K = \left[ \frac{C \cdot U_{10}}{Q} \right]_{\text{werkelijk}} = \left[ \frac{C \cdot U_{10} \cdot S^2}{Q} \right]_{\text{model}}$$

Waarin:  $C$  : concentratie, in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  
 $Q$  : emissie, in  $\text{g}/\text{s}$ ;  
 $U_{10}$  : de windsnelheid in het vrije veld op een hoogte van 10 m, in  $\text{m}/\text{s}$ ;  
 $S$  : schaalfactor;

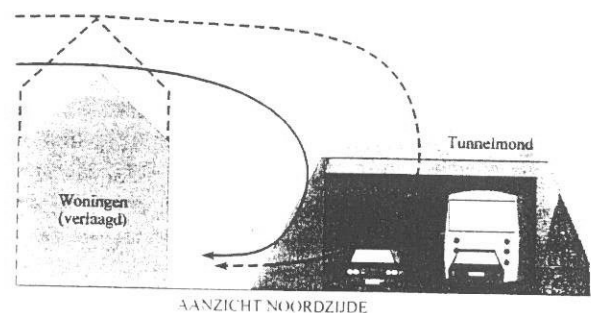
Bij deze berekeningen wordt zowel uitgegaan van de windsnelheden op 10 m hoogte in het meteostation als de windsnelheden op "10 m" hoogte in het vrije veld in de windtunnel (zie bovenstaande vergelijking). De lokaal optredende windsnelheden op lagere hoogte worden door juiste modellering van het schaalmodel gerealiseerd.

Het Meteorologisch instituut van de Universiteit van Hamburg heeft onlangs de resultaten van een windtunnelonderzoek in detail vergeleken met resultaten van concentratiemetingen in een straat in Hannover<sup>3</sup>. Uit deze vergelijking blijkt dat een goede overeenkomst bestaat tussen de werkelijk optredende concentraties en de resultaten van het windtunnelonderzoek.

Met behulp van de door metingen in het model bepaalde concentratiecoëfficiënt kunnen per windrichting, gebruik makend van gegevens omtrent de in werkelijkheid optredende bronsterkten en achtergrondconcentraties, de optredende concentraties in diverse beoordelingsposities worden bepaald. De verwerking van deze gegevens tot de gewenste gemiddelde en/of percentielwaarden kan plaatsvinden volgens de gebruikelijk methoden in het NM 1<sup>4</sup> en het NM 2<sup>5</sup>.

## Cases

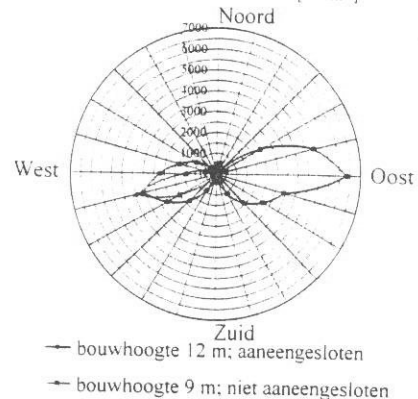
- Tunnelmonden en gebouwinvloeden:



AANZICHT NOORDZIJDE

## Tunnelmonden: gebouwinvloed

Concentratiecoëfficiënt, in  $[\text{m}/\text{cm}^3]$



Figuur 1: Situatieschets tunnelmond (niet op schaal) en grafische weergave van de meetresultaten zoals verkregen in de windtunnel.

De uitlaatgassen van het wegverkeer in een tunnel komen bij een tunnelmond geconcentreerd vrij. In toenemende mate is evenwel sprake van tunnelmonden in een dichtbebouwde stedelijke omgeving, waarbij een effectieve verspreiding en verdunning van de verontreinigde lucht uit een tunnel kan worden belemmerd door gebouwinvloeden. Binnen ons bureau zijn inmiddels diverse onderzoeken verricht naar de concentraties luchtverontreiniging in dergelijke situaties.

In een onlangs onderzochte situatie was sprake van een voorlopig ontwerp voor een woontoren met een hoogte van ca. 25 meter, gecombineerd met belendende woningen met een bouwhoogte van ca. 12 meter (zie figuur 1). Het complex is geprojecteerd op ca. 30 meter ten oosten van een tunnelmond. In de tunnel is sprake van intensief verkeer (verkeersintensiteit ca. 45.000 motorvoertuigen per etmaal). Tevens is sprake van hoge achtergrondconcentraties.

De situatie is op schaal nagebouwd, waarbij ter plaatse van de tunnelmond een tracergasbron in de maquette is ingebouwd. In de windtunnel zijn in de maquette concentratiemetingen uitgevoerd voor de gevel van een dicht bij de tunnelmond gelegen woning. De verkregen meetresultaten zijn (als functie van de windrichting) schematisch weergegeven in figuur 1.

Zoals kan worden verwacht blijkt uit de meetresultaten dat bij westelijke windrichtingen (van de tunnelmond naar de woning) uitlaatgassen uit de tunnelmond bij de woning terechtkomen. Opmerkelijk is echter dat bij oostelijke windrichtingen tot een factor 2 hogere concentraties worden gemeten dan bij westelijke windrichtingen. De tunnellucht wordt opgenomen in de lijzijdewervels van het complex en zo naar de bovenwinds gelegen woning getransporteerd.

Met behulp van deze meetresultaten, de meteostatistiek en achtergrondconcentraties voor het betreffende gebied is vastgesteld dat nabij deze woning sprake kan zijn van kritische concentraties stikstofdioxide.

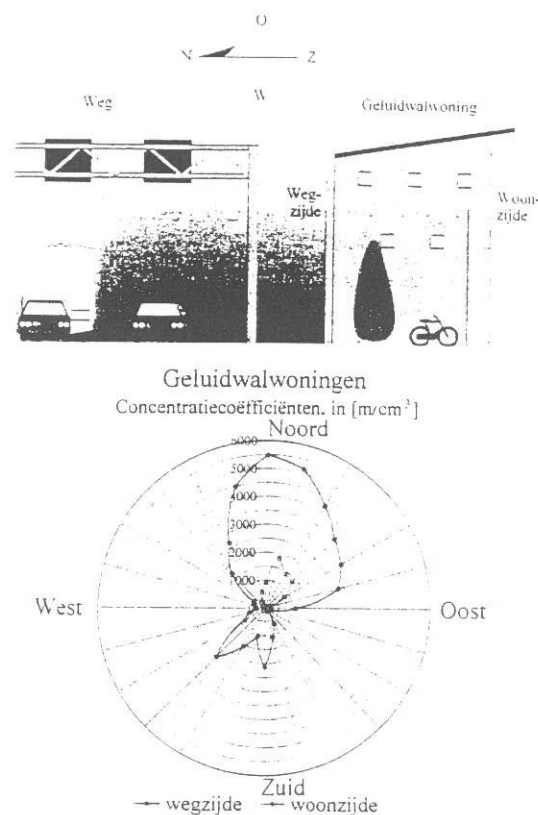
Naar aanleiding van deze resultaten is de ontwerphoogte van de woningen verlaagd en is een doorgang geprojecteerd tussen de woningen en de woontoren. Het gewijzigde ontwerp is vervolgens in de windtunnel beproefd (zie figuur 1).

Uit de meetresultaten blijkt dat na aanpassing van het ontwerp geen sprake meer is van een significante opname van tunnellucht in de lijzijdewervel. Tevens blijken de optredende concentraties bij noordwestelijke en zuidwestelijke windrichtingen sterk gereduceerd. De luchtkwaliteit voldoet in het nieuwe ontwerp aan de relevante grenswaarden.

#### - Geluidwalwoningen

In een andere (geprojecteerde) situatie is onlangs onderzoek verricht naar de concentraties luchtverontreiniging nabij een snelweg met een verkeersintensiteit van ca. 65.000 motorvoertuigen per etmaal. In de bestaande situatie bedraagt de afstand tussen de weg en de woonbebouwing meer dan 200 meter.

Thans wordt overwogen om middels de bouw van geluidwalwoningen ook het tussenliggende gebied geschikt te maken voor woningbouw (zie figuur 2). Voor een effectieve akoestische afscherming dient de afstand tussen deze geluidwalwoningen en de weg echter zo klein mogelijk te zijn. Door deze geringe afstand zullen de geluidwalwoningen de verspreiding van uitlaatgassen in sterke mate gaan beïnvloeden. Windtunnelonderzoek bleek noodzakelijk om deze effecten in kaart te brengen, en om op korte afstand van de weg (ter plaatse van de geluidwalwoningen) uitspraken te kunnen doen over de luchtkwaliteit. Ook zijn de gevolgen van de bouw van de geluidwalwoningen op de luchtkwaliteit bij de bestaande woningen bestudeerd.



**Figuur 2:** Situatieschets geluidwalwoning (niet op schaal) en grafische weergave van de meetresultaten zoals verkregen in de windtunnel.

De emissie ten gevolge van het wegverkeer is in de windtunnel gesimuleerd door stripvormige tracergasbronnen. Voor een groot aantal windrichtingen zijn concentratiemetingen verricht aan de wegzijde van de geluidwal, aan de woonzijde van de geluidwal en op grotere afstand van de weg (bij bestaande woningen). Deze metingen zijn herhaald voor de bestaande situatie (zonder geluidwal). In figuur 2 zijn voor twee posities aan weerszijden van de geluidwal de gemeten concentraties weergegeven.

Zoals uit figuur 2 blijkt, is aan de Zuidzijde van de geluidwal sprake van relatief hoge concentraties uitlaatgassen bij zowel noordelijke als zuidelijke windrichtingen. De bijdrage van de zuidelijke windrichtingen wordt veroorzaakt door het lijzijde-effect van de geluidwal. Mede gezien de ter plaatse heersende achtergrondconcentraties, blijkt uit verdere berekeningen dat in het onderhavige gebied diverse concentratie-grenswaarden worden benaderd danwel overschreden.

Aan de woonzijde is echter uitsluitend sprake van aanvoer bij noordelijke windrichtingen (zie figuur 2). Deze bijdrage is bovendien belangrijk geringer. De aanwezigheid van de geluidwalwoningen leidt tot extra wervelingen, waardoor een grotere verdunning van de uitlaatgassen optreedt. De aanleg van de geluidwalwoningen kan dus leiden tot een aanzienlijke verbetering van de luchtkwaliteit achter de wal. Deze verbetering is zodanig dat aan de woonzijde van de geluidwal alle relevante grenswaarden zullen worden gerealiseerd.

Uit de metingen blijkt dat op grotere afstand achter de geluidwal het positieve effect minder uitgesproken is. In absolute zin zijn

de concentraties op een afstand van ca. 100 meter achter de geluidwal zelfs hoger dan op korte afstand achter de geluidwal. Vergeleken met de situatie zonder geluidwal is evenwel nog altijd sprake van een aanzienlijke verbetering. Door de bouw van de geluidwalwoningen kan de bijdrage van de weg op grotere afstand met een factor 2 of meer dalen. Overigens blijkt uit metingen dat nabijgelegen hoge gebouwen, doorgangen en onderbrekingen lokaal een grote invloed kunnen hebben op de concentraties. De bovengenoemde resultaten zijn derhalve niet zonder meer te generaliseren.

### Beperkingen

Alle nabootsingen van de werkelijkheid hebben beperkingen, zo ook windtunnelonderzoek.

Een belangrijke beperking wordt gevormd door het ontbreken van thermische effecten tijdens een meting. In bepaalde gevallen zijn geëmitteerde gassen warmer dan de omgevingslucht, en zullen derhalve de neiging hebben te stijgen. Nabootsing van dit effect in de windtunnel is niet goed mogelijk en vindt derhalve niet plaats. Op geringe hoogte in de tunnel gemeten concentraties kunnen daardoor hoger zijn dan in werkelijkheid.

Een ander thermisch effect is de verwarming van het aardoppervlak, hetgeen aanleiding kan geven tot extra turbulentie in de atmosfeer vanwege temperatuurverschillen, en daarmee tot een versnelde verdunning en stijging van geëmitteerde gassen. Dit effect is met name van belang bij lage windsnelheden en wordt in de windtunnel doorgaans niet meegeëmitteerd.

Voorts is in de tunnel geen sprake van grootschalige turbulenties zoals in de atmosfeer. Hierdoor is het zogenaamde meandereffect in de verspreiding van luchtverontreiniging maar zeer beperkt aanwezig. Tevens worden hierdoor in de windtunnel de optredende concentratiemaxima rondom bronnen enigszins overschat.

Gezien dat het Getal van Reynolds tijdens een windtunnelproef veel kleiner is dan in werkelijkheid, kunnen onder bepaalde omstandigheden viskeuze effecten een te grote rol gaan spelen. Een praktische beperking van de toepassing van de atmosferische grenslaagtunnel die hieruit voortvloeit zijn de soms onvoldoende natuurgetrouwe stromingspatronen rond gebouwen met sterk gekromde oppervlakken. Ook eventuele wandeffecten en blokkeringseffecten kunnen een rol spelen, waardoor het onderzoeksgebied enigszins beperkt kan worden. Deze onnauwkeurigheden kunnen echter in veel gevallen worden ondervangen middels een adequate modellering.

### Toekomstige ontwikkelingen

Windtunnelonderzoek is al meer dan 100 jaar een belangrijk instrument voor stromingsonderzoek. Tegenwoordig worden echter in steeds meer vakgebieden laboratoriumproeven vervangen door numerieke modelberekeningen (Computational Fluid Dynamics). Inmiddels zijn diverse numerieke methoden op de markt waarmee eenvoudige verspreidingsberekeningen in een gebouwde omgeving kunnen worden uitgevoerd. Dergelijke modellen worden reeds met succes toegepast voor onder andere inpanidige stromingsproblemen (ventilatie, rookgasafvoer, etc.).

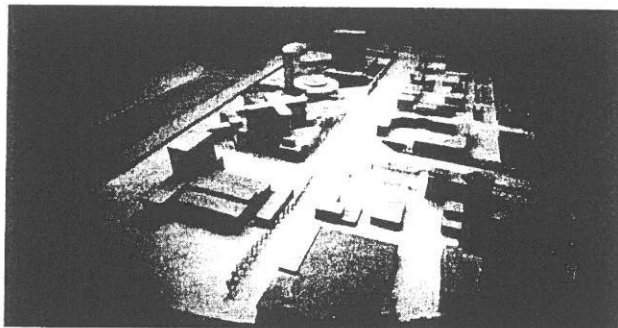
In een onlangs uitgevoerde vergelijking van praktijkmetingen, windtunnelonderzoek en de rekenresultaten van een gangbare numerieke methode<sup>3</sup> bleek echter dat een dergelijk model, met name in complexe

gebouwde omgevingen, vooralsnog geen betrouwbare resultaten levert. De huidige generatie numerieke modellen beschikt nog over onvoldoende geometrisch oplossend vermogen om complexe uitpanidige situaties (met name met betrekking tot turbulentie-aspecten) correct te beschrijven. Tevens is gebleken dat diverse empirische modelcomponenten nog onvoldoende zijn ontwikkeld voor gebruik in verspreidingsberekeningen. Verwacht mag evenwel worden dat, gezien de toenemende rekenkracht van computers en tevens de thans gepleegde onderzoeksinspanningen, deze rekenmodellen geleidelijk meer betrouwbaar en bruikbaar zullen worden. Met name validatie van de gebruikte rekenmodellen is van eminent belang<sup>6</sup>.

### Conclusies

Aan de hand van het hiervoor geschetste kan worden geconcludeerd dat de verspreiding van luchtverontreiniging met name in complexe gebouwde omgevingen, stedelijk en industrieel, op relatief betrouwbare wijze middels windtunnelonderzoek bepaald kan worden. Het hanteren van breed toegankelijke rekenmodellen is (nog) niet voor alle gevallen goed mogelijk en leidt met name in complexe situaties tot onbetrouwbare resultaten.

De toekomst ligt wellicht in de uitgebreidere toepassing van meer specifieke numerieke rekenmodellen waarmee de verspreiding van luchtverontreiniging kan worden bepaald. Daartoe is evenwel nog uitgebreid nader onderzoek en verdere ontwikkeling en validatie noodzakelijk.



- 1 Dorèl, Van Dam en Kruij, 1997  
Naar een beter luchtkwaliteitsbeleid rond wegen Lucht, 1997, nr. 4
- 2 Van Dam, Dorèl en Kruij, 1998  
Luchtkwaliteitsbeleid in ruimtelijk perspectief Lucht, 1998, nr. 3
- 3 Schatzmann, M., B. Leitl, en J. Liedtke, 1999  
Validierung numerischer Modelle für Ausbreitungssimulationen in Stadtgebieten Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, september 1999
- 4 Werkgroep verspreiding luchtverontreiniging, 1981  
FREQUENTIEVERDELINGEN VAN LUCHTVERONTREINIGINGS-CONCENTRATIES, een aanbeveling voor een rekenmethode. Staatsuitgeverij, 's Gravenhage
- 5 Projectgroep Revisie Nationaal Model, 1998  
HET NIEUWE NATIONAAL MODEL; Model voor de verspreiding van luchtverontreiniging uit bronnen over korte afstanden. TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie, Apeldoorn.
- 6 Leitl, B., en M. Schatzmann  
Generierung umfassender Vergleichsdatensätze für die Entwicklung und Validierung mikroskaliger numerischer Ausbreitungsmodelle Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, oktober 1999