

RIKSINSTITUUT VOOR VOLKSGEZONDHEID EN MILIEUHYGIËNE

Rapport nr. 623710003

**Blootstellingsmodel AirPEX  
(Air Pollution Exposure model):  
ontwikkeling en modelbeschrijving.**

H.J. van Scheindelen, M. Marra, P.J.A. Rombout  
mei 1995

Dit onderzoek werd uitgevoerd in opdracht en ten laste van het Directoraat-Generaal  
Milieubeheer, Directie Lucht en Energie

Met dank voor de constructieve discussies en commentaren uit velerlei hoek:  
dr ir E. Lebret (CCM), drs A.E.M. de Hollander (CCM), dr W. Slob (CWM), drs K.  
van Velze (LLO), dr W. H. Könemann (TOX), dr K. Krijgsheld (DGM) en ir J.J. van  
Scheindelen.

## Verzendlijst

- 1 Directeur Lucht en Energie, DG Milieubeheer - Ir G.M. van der Slikke
- 2 Plv. DG Milieubeheer - Dr ir B.C.J. Zoeteman
- 3 DG Volksgezondheid - Prof. dr B. Sangster
- 4 Drs R.J.T. van Lint, Directie Lucht en Energie
- 5 Dr K. Krijgsheld, Directie Lucht en Energie
- 6 Ir A. Blom, Directie Lucht en Energie
- 7 Ir J.A. Herremans, Directie Lucht en Energie
- 8 Prof. dr B. Brunekreef, LUW
- 9 Prof. dr J. Lelieveld, LUW
- 10 Dr ir H. Harssema / Ir N. Janssen, LUW
- 11 Dr ir G. Hoek / Ir S. van der Zee, LUW
- 12 Dr D. van den Hout, TNO
- 13 Dr C. van den Boogaard, VROM
- 14 Dr J.J. Ende, VWS
- 15 Dr J.J.L. Pieters, VWS
- 16 Drs. R.C.J. Smit, V&W
- 17 Prof. dr V. Feron, TNO
- 18 Drs. J.P. Schouten / Dr B. Rijcken
- 19 Prof. dr D. Postma, RUG
- 20 Dr R. Bos, KUN
- 21 Dr J. van Wijnen, GG&GD Amsterdam
- 22 Dr J. Marijnissen, TU Delft
- 23 Ing. P. van Slooten, TNO
- 24 Drs. C. Dorland, VU
- 25 NWO, Werkgemeenschap "Milieu en Gezondheid", secretaris Dr L. van Bree
- 26 Astmafonds, secretaris Wetenschappelijk onderzoek, M.M. Dirksen
- 27 Dr W.F. Passchier, secretaris Gezondheidsraad
- 28 Drs E.J. Schooten, secretaris commissie "Gezondheidseffecten door luchtverontreiniging",  
Gezondheidsraad
- 29 Commissie onderzoek Luchtverontreiniging, secretaris Dr J. van Ham
- 30 Dhr P. Franssen, Stichting Natuur en Milieu
- 31 Prof. dr B. Seifert / Prof. dr M. Wagner / Dr N. Englert, Umwelt Bundesamt, Berlin
- 32 Dr M Krzyzanowski / Prof. dr M. Younes, WHO European Centre for Environment and  
Health, Bilthoven
- 33 Depot van Nederlandse Publikaties en Nederlandse Bibliografie
- 34 Directie Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne
- 35 Hoofd Bureau Voorlichting en Public Relations RIVM
- 36 Dr ir G. de Mik
- 37 Dr W.H. Könemann
- 38 Prof. dr ir D. Kromhout
- 39 Ir F. Langeweg

40	Dr D. Onderdelinden
41	Dr J. Seidell
42	Dr ir H.J.G.M. Derks
43	Dr M.P. van Veen
44	Dr ir E. Lebret
45	Ir P. Fischer
46	Drs A.E.M. de Hollander
47	Ir D.J.M. Houthuijs
48	Dr W. Slob
49	Dr R.M. van Aalst
50	Ir H.S.M.A. Diederén
51	Drs. H.J.Th. Bloemen
52	Drs. K. van Velze
53	Drs. J.M.M. Aben
54	Dr F.A.A.M. de Leeuw
55	Drs. H.C. Eerens
56	Dr L. van Bree
57	Drs. S. de Loos
58	Dr ir E. Buringh
59	Dr ir E.H.J.M. Jansen
60	Dr ir M.J. Zeilmaker / Dr ir M.N. Pieters
61-63	Auteurs
64-65	Bibliotheek RIVM
66	Bureau projecten- en rapportenregistratie
67-90	Reserve exemplaren ten behoeve van Bureau Rapportenbeheer

# Inhoudsopgave

Verzendlijst .....	iii
Inhoudsopgave .....	v
Summary .....	1
Samenvatting .....	2
1. Inleiding .....	4
1.1. Achtergronden .....	4
1.2. De causale keten .....	5
1.2.1. Beschrijving .....	5
1.2.2. Modulerende factoren .....	6
1.2.3. Methodologie van kwantitatieve risicoschatting .....	6
1.3. Aanpak .....	7
1.4. Doelstelling en eisen .....	8
1.4.1. Doelstelling .....	9
1.4.2. Eisen .....	9
2. Bestaande modellen .....	11
2.1. Inleiding .....	11
2.2. NEM .....	11
2.3. PNEM .....	12
2.4. SHAPE .....	12
2.5. REHEX .....	13
2.6. Conclusies .....	13
3. Blootstelling .....	15
3.1. Algemeen .....	15
3.2. Grootheden van blootstelling en dosis .....	15
3.3. Relatie met effecten .....	19
4. Het Air Pollution Exposure model (AirPEX) .....	23
4.1. Modelbeschrijving .....	23
4.1.1. Algemeen .....	23
4.1.2. De hoofdmodules .....	23
4.1.3. Sociaal-demografische gegevens .....	24
4.1.4. Luchtkwaliteitsgegevens .....	25
4.1.5. Activiteitenpatronen .....	25
4.2. Modelleren van potentiële en werkelijke blootstelling .....	25

4.3. Modelling van geïnhaleerde dosis	26	
4.4. Outputparameters	29	
4.5. Implementatie	30	
<b>5. AirPEX voor ozon</b>	<b>32</b>	
5.1. Algemeen	32	
5.2. Inputgegevens	32	
5.2.1. Sociaal-demografische gegevens	32	
5.2.2. Regionale concentratie gegevens	32	
5.2.3. De activiteitenpatronen van de Nederlandse bevolking	33	
5.3. Parameter instellingen	34	
5.3.1. De macro-omgeving functie	34	
5.3.2. De micro-omgeving functie	34	
5.4. Outputvoorbeeld	36	
<b>6. Conclusies en discussie</b>	<b>41</b>	
Referenties	45	
<b>Bijlagen</b>		
I	Bestaande blootstellingsmodellen	49
II	De regionale gegevens	54
III	Activiteitenpatronen	56
IV	Definities van gebruikte symbolen	58

## Summary

All people living in areas with polluted air are exposed to air pollutants, which may lead to an impaired health status. The causal chain from air quality through exposure to health effects, describes the succession of events which may result in health effects. All elements of this chain contribute to the resulting health risk of a population. The quantitative assessment of population exposure is an essential part of the quantitative assessment of population health risks. Exposure modelling is identified as an appropriate method for assessing the actual exposure of a population, and to evaluate the effects of policy options and trends in air quality. The existing (U.S.) exposure models were developed for rather specific purposes. They are not fully appropriate for use in the Dutch and European situation.

This report describes the development of the AirPEX (Air Pollution Exposure) model in which the basal components of the above mentioned causal chain are incorporated, with the focus on exposure. The model aims to quantify the actual exposure to air pollutants of (part of) the population and to evaluate the effects of policy options and trends in air quality on the population exposure.

The requirements of the model are defined by its intended use in risk assessments. The model should be independent of air pollutant and geographic area. The model should be able to provide several exposure output parameters that are relevant to a specific compound or to a specific health risk demand. Identification of different population groups or groups at increased health risk in the modelled population exposure is an important requirement. The model should contribute to providing insight into the relative importance of the different factors and into the effectivity of risk reduction measures.

The AirPEX model calculates time series of exposure profiles for each individual in a defined population from demographic data, air quality data, and activity patterns of the population. Distributions of population exposure are calculated from these individual profiles. To illustrate the use of the model an application for ozone is given. Compound specific parameters and the available input data are described followed by the results of a test simulation of the exposure of the Dutch population to ozone on a day with increased photochemical air pollution.

The implemented model meets the requirements as stated above. The model is independent of air pollutant and geographical area. It offers a variety of output parameters and many possibilities for defining input parameters and functions. Furthermore, a module for the application of dose-response relationships can be incorporated easily providing for assessments of health effects.

AirPEX is developed as a versatile and flexible information system, valuable for health risk assessments of air pollutants, for the evaluation of policy measures and air quality trends and in more effectively directing research in this area.

## Samenvatting

Alle mensen die leven en wonen in gebieden met verontreinigde lucht worden blootgesteld aan luchtverontreiniging. Deze blootstelling kan leiden tot gezondheidseffecten in (een deel van) de bevolking. De causale keten, beginnend bij emissie, via luchtkwaliteit en blootstelling tot eventueel optredende gezondheidseffecten, beschrijft de causale opeenvolging van de onderdelen en processen die tot een gezondheidseffect kunnen leiden.

Tezamen bepalen deze onderdelen het gezondheidsrisico van de bevolking.

Een essentieel onderdeel van de kwantitatieve schatting van het gezondheidsrisico van luchtverontreiniging is de kwantitatieve schatting van de blootstelling van een populatie aan luchtverontreiniging. Blootstellingsmodellen beschrijven de werkelijke blootstelling van de bevolking aan luchtverontreiniging, en kunnen dienen voor risicoschatting en voor het evalueren van mogelijke beleidsmaatregelen of trends in luchtkwaliteit. De bestaande, meest Amerikaanse, blootstellingsmodellen zijn evenwel onvoldoende bruikbaar voor risico-schattingsdoelstellingen voor de Nederlandse en Europese blootstellings situatie, voor een deel omdat ze voor (zeer) specifieke doeleinden zijn ontwikkeld.

In dit rapport wordt verslag gedaan van de ontwikkeling van het blootstellingsmodel AirPEX ("Air Pollution Exposure model"). In dit model zijn de onderdelen van de causale keten opgenomen, waarbij de nadruk op blootstelling is gelegd. Het model beoogt de werkelijke blootstelling van (delen van) de bevolking aan luchtverontreinigende stoffen te kwantificeren en het effect van beleidsmaatregelen en trends in luchtkwaliteit op de bevolkingsblootstelling te evalueren. Het beoogde gebruik voor risicoschattingsdoeleinden stelt een aantal eisen aan het model. Het te ontwikkelen model moet onafhankelijk zijn van luchtverontreinigende stof en geografische gebied. Het model moet schattingen kunnen geven van verschillende blootstellingsparameters die relevant zijn voor een specifieke luchtverontreinigende stof, en die bijvoorbeeld gebruikt kunnen worden om schattingen te maken van optredende gezondheidseffecten. Het is noodzakelijk onderscheid te kunnen maken in bevolkingsgroepen die extreem hoog of laag worden blootgesteld of die extreem gevoelig zijn voor luchtverontreiniging. Het model moet tevens inzicht geven in de relatieve bijdrage van factoren die leiden tot een (verhoogde) blootstelling. Daarnaast moet het model bruikbaar zijn voor de beantwoording van specifieke beleidsvragen, zoals de effectiviteit van risico-reductie maatregelen.

AirPEX simuleert de werkelijke blootstelling van een verzameling individuen (een populatie) aan een luchtverontreinigingscomponent. Als eerste wordt met behulp van Monte Carlo methoden een representatieve populatie samengesteld. Vervolgens wordt voor elk individu uit de populatie het verloop van de blootstelling in de tijd berekend. En tenslotte berekent AirPEX de gewenste populatie-blootstellingsparameters. AirPEX gebruikt hiervoor drie soorten gegevensbestanden als input, namelijk gegevens over de



demografie van de bevolking, het verloop in de tijd van de buitenluchtconcentraties luchtverontreinigingscomponent, en het activiteitenpatroon van de bevolking.

Ter illustratie van het gebruik van het model is de uitwerking van AirPEX voor de stof ozon gegeven. Hierbij zijn de ozon-specifieke modelcomponenten en de beschikbare inputgegevens beschreven, gevolgd door een voorbeeldberekening van de blootstelling van de Nederlandse bevolking aan ozon op een dag met verhoogde fotochemische luchtverontreiniging.

Het model zoals dat momenteel is geïmplementeerd voldoet aan de gestelde eisen. Het model is stof- en gebiedsonafhankelijk, het biedt een grote variabiliteit aan outputparameters en veel mogelijkheden om inputvariabelen en -functies te definiëren. Het model is op eenvoudige wijze uit te breiden met een blootstellings-respons module waarmee een kwantitatieve schatting van de gezondheidseffecten kan worden berekend.

Het ontwikkelde model AirPEX is een compleet en flexibel rekensysteem, waardevol bij de beantwoording van vragen naar kwantitatieve gezondheidsrisico's van luchtverontreiniging bij het evalueren van beleidsmaatregelen en trends in luchtkwaliteit, en bij het aansturen van onderzoek op het gebied van risicobeheersing en risicovaststelling. Het kan worden toegepast voor de beschrijving van blootstelling van de bevolking in Nederland en tevens voor blootstellingssituaties elders.

# 1. Inleiding

## 1.1. Achtergronden.

Van alle verontreinigende stoffen die via de milieucompartimenten tot ons komen zijn de verontreinigen die via het medium lucht komen waarschijnlijk het meest onontkoombaar voor de bevolking. Alle mensen die zich in een gebied met verontreinigde lucht bevinden, worden in meer of mindere mate blootgesteld aan luchtverontreinigingen die eventueel een effect op de gezondheid kunnen veroorzaken. Voor het beheersen van de gezondheidsrisico's door verontreinigingen is het noodzakelijk inzicht te verkrijgen in de onderliggende oorzakelijke verbanden, en dienen risico's kwantificeerbaar te worden gemaakt. Hiervoor is het noodzakelijk te kunnen beschikken over kwantitatieve schattingen van de werkelijke blootstelling, en over kwantitatieve blootstellings-respons relaties van de verschillende verontreinigingen.

In de huidige risicoschatting van luchtverontreinigende stoffen wordt vaak niet uitgegaan van de werkelijke blootstelling van de bevolking. Het risico voor de bevolking wordt geschat aan de hand van gemeten of gemodelleerde luchtkwaliteitsgegevens.

Aan de toenemende vraag naar kwantitatieve risicoschattingen is met deze methode niet te voldoen, omdat de werkelijke blootstelling van de bevolking niet nauwkeurig genoeg wordt beschreven. In de huidige methodiek wordt bovendien niet rekening gehouden met het gegeven dat de concentraties verontreinigende stoffen in stedelijke gebieden sterk kunnen afwijken van de gemeten plattelands-concentraties. Ook wordt geen rekening gehouden met het feit dat mensen zich gedurende de dag voortdurend door uiteenlopende ruimtes met verschillende luchtkwaliteit heen bewegen. Deze ruimtes worden de micro-omgevingen genoemd; dit kunnen zijn "binnen-omgevingen" (zoals huiskamer en auto), en "buiten-omgevingen" (zoals woonwijk, drukke straat).

Een andere tekortkoming van de huidige risicoschattingmethode wordt zichtbaar wanneer de betekenis van de overschrijding van luchtkwaliteitsnormen (opgesteld vanuit gezondheidskundig oogpunt) in termen van verhoogd risico moet worden aangegeven. Evenmin kan met de huidige schattingsmethode de effectiviteit van beleidsmaatregelen (op het gebied van emissie-reducties of gedragsadviezen aan de bevolking) in kwantitatief opzicht worden voorspeld.

Vanuit de risicoschattingvragen is er een groeiende behoefte aan een methode waarmee de werkelijke blootstelling van (delen van) de bevolking aan luchtverontreinigende stoffen kwantitatief kan worden geschat, en waarmee tevens de effecten van beleidsmaatregelen en trends in luchtkwaliteit op de blootstelling en daarmee de respons kan worden geschat. In dit rapport wordt een methode beschreven waarmee tegemoet wordt gekomen aan deze behoefte: namelijk een rekensysteem voor de modellering van de werkelijke blootstelling van de bevolking aan luchtverontreinigende stoffen.

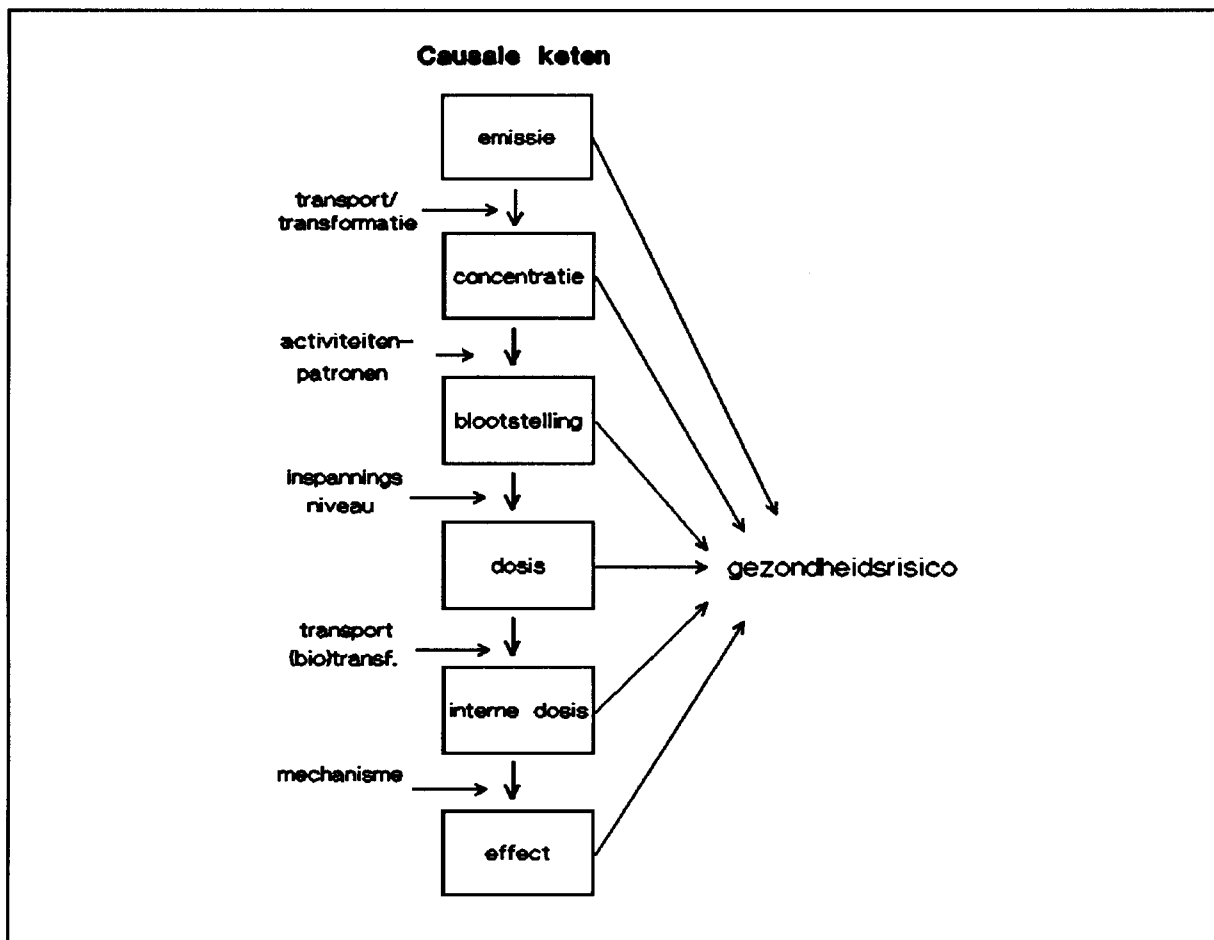
## 1.2. De causale keten.

### 1.2.1. Beschrijving

Ter introductie van de in dit rapport gebruikte terminologie, en om de relaties tussen de verschillende onderdelen en parameters van de kwantitatieve risico-schatting te verduidelijken, is het van belang een goed beeld te hebben van de oorzakelijke of causale keten tussen de emissie van verontreinigende stoffen en het uiteindelijke effect ervan op de gezondheid.

In deze paragraaf wordt nader ingegaan op de onderdelen van deze causale keten, en op de factoren die deze onderdelen kunnen beïnvloeden. We beperken ons tot de mens en tot de inhalatoire blootstellingsroute.

De weg die toxische stoffen afleggen door het milieu vanaf het punt waarop ze vrijkomen tot het punt waarop ze een effect op de gezondheid hebben, kan worden weergegeven met een keten van componenten die causaal gerelateerd zijn (figuur 1).



Figuur 1. De modulerende factoren en de plaats waarop deze aangrijpen in de causale keten, uiteindelijk leidend tot een gezondheidsrisico.

Als een direct of indirect gevolg van menselijke activiteiten ontstaat een emissie van stoffen, die door transport en eventuele transformatie leidt tot een zekere concentratie van een toxische stof in de lucht. Het contact van de mens met een stof wordt blootstelling genoemd. Inademing van de stof leidt tot een geïnhaleerde dosis, deze leidt door retentie en verspreiding in het lichaam, tot een interne dosis of weefseldosis. Het contact met het weefsel leidt tot een effect op cel/weefsel/orgaan-niveau, eventueel gevolgd door een effect op de gezondheid.

### 1.2.2. Modulerende factoren.

Bij elke stap uit de causale keten treden "modulerende factoren" op die van invloed zijn op het onderdeel en daarmee een invloed hebben op het gezondheidseffect (zie figuur 1). De luchtkwaliteit in de leefomgeving van een persoon, d.w.z. de concentratie van een of meer verontreinigende stoffen op de plaats waar de mens die inademt, wordt beïnvloed door processen als transport, transformatie, afbraak en depositie.

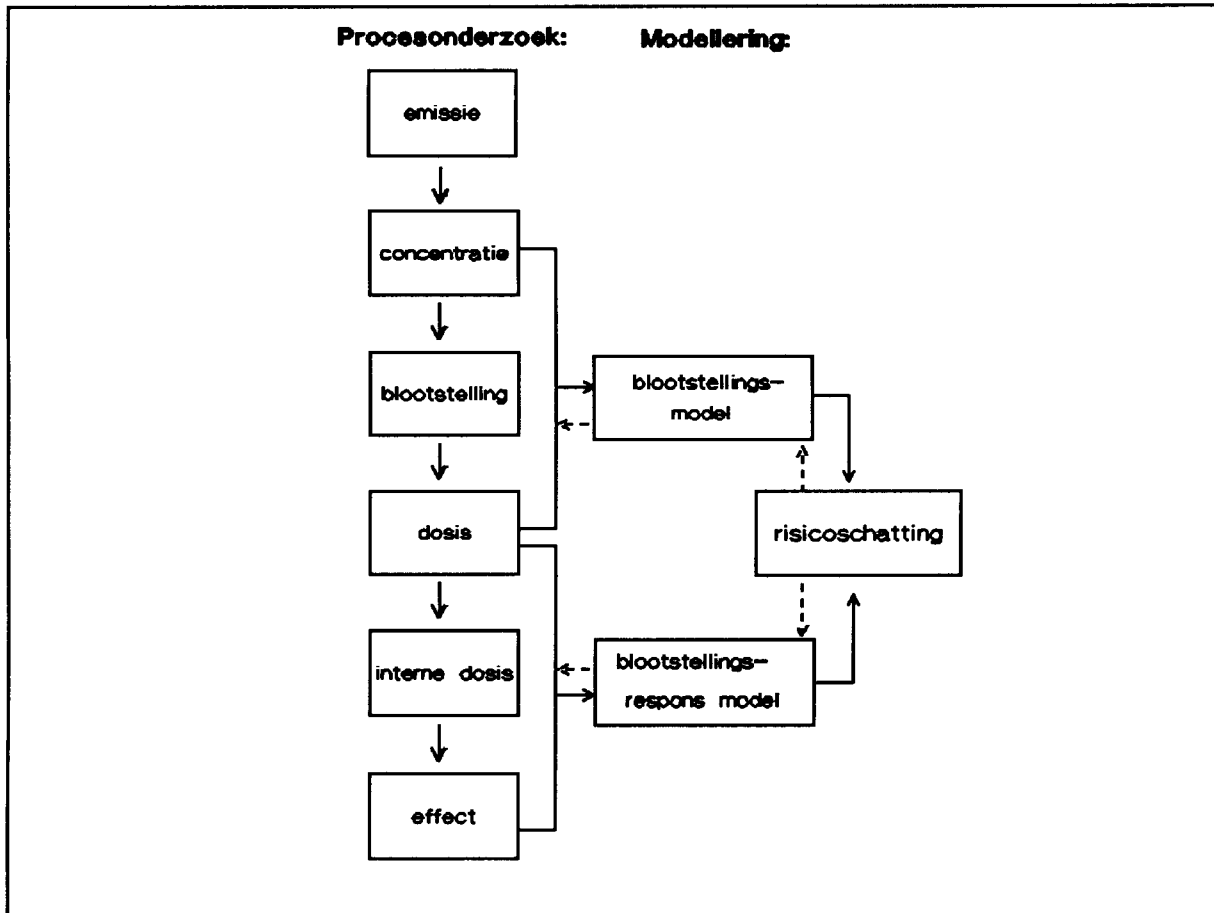
De concentraties in de verschillende ruimtes bepalen samen met de hoeveelheid tijd die een persoon er doorbrengt, d.w.z. zijn activiteitenpatroon, de blootstelling van die persoon. De hoeveelheid lucht die wordt ingeademd is een functie van de lichamelijke inspanning van een persoon, en is weer te geven als onderdeel van het activiteitenpatroon: het inspanningsniveau. Uit de blootstelling en de ingeademde hoeveelheid lucht is de geïnhaleerde dosis te berekenen.

Processen als transport door het lichaam en (bio)transformatie bepalen de hoeveelheid stof die in contact komt met het (ontvankelijk) weefsel, m.a.w. de interne dosis.

Het uiteindelijk optredende effect is afhankelijk van het mechanisme, d.w.z. de wijze waarop een stof een toxische werking op het weefsel uitoefent.

### 1.2.3. Methodologie van kwantitatieve risicoschatting.

Wanneer de relaties tussen de onderdelen onderling en naar de beïnvloedende factoren zijn vastgelegd in abstracte begrippen of formules kan gesproken worden van een model. De mathematische beschrijving van blootstelling en dosis met gebruikmaking van gegevens over concentraties, activiteitenpatronen en inspanningsniveaus wordt een blootstellingsmodel genoemd (figuur 2). De abstracte beschrijving van de relatie tussen blootstelling en effect wordt een blootstellings-responsmodel genoemd. Kwantitatieve risicoschatting vindt plaats door informatie uit de blootstellingsmodellering te combineren met informatie uit de blootstellings-respons modellering. Onderzoek vanuit de verschillende onderdelen van de causale keten, komt via de modellering tot uiting in de risicoschatting. Aansturing van zowel het onderzoek als de modellering vindt plaats door terugkoppeling (gestippelde lijn) vanuit de risicoschatting (Programmacommissie "Mens en Lucht", 1994) .



Figuur 2. De onderdelen van de causale keten in relatie tot blootstellings- en blootstellings-respons modellering, en de informatiestromen in het risicoschattingsproces.

Het algemeen toepasbare blootstellingsmodel dat in het kader van de bovenbeschreven methodologie is ontwikkeld en in dit rapport beschreven wordt, omvat de onderdelen concentratie, blootstelling en dosis. Het blootstellings-responsmodel dat volgens de beschreven methodologie noodzakelijk is voor de schatting van gezondheidsrisico's, wordt in dit rapport niet beschreven. Blootstellings-responsmodellen zijn namelijk stofspecifiek en zullen voor elke luchtverontreinigende component apart moeten worden geformuleerd. In het uiteindelijke rekensysteem zullen echter alle onderdelen van de causale keten aanwezig zijn, waarbij voor elke verontreinigende stof een apart blootstellings-responsmodel geformuleerd dient te worden.

### 1.3. Aanpak.

Modelleringsprocessen in het algemeen worden beschreven door de onderstaande fasering. De fases zijn als volgt geformuleerd:

Fase	Inhoud
1. Formuleren probleem- of doelstelling	- vaststellen doel en eisen
2. Probleemanalyse	- definiëren van blootstelling en dosis, berekeningswijze, groot-heden - inventarisatie informatiebehoefte en -beschikbaarheid - inventarisatie bestaande blootstellingsmodellen - opstellen van de richtlijnen, eisen en randvoorwaarden voor het ontwerp
3. Ontwerp model	- constructie model in wiskundige formules, tekst en diagrammen - definitie ontwerpspecificaties
4. Implementatie model	- cyclus van bouwen (programmeren), testen en verificatie
5. Modelcalibratie (indien nodig)	- afstemming modeluitkomsten op gemeten waarden d.m.v. instelling onbekende parameters
6. Modelanalyse	- inzicht verkrijgen in model-eigenschappen, sterke en zwakke kanten, gevoeligheid van parameters, onzekerheid/ variabiliteit in de modeluitkomsten
7. Validatie model	- test op een onafhankelijke dataset, om inzicht te verkrijgen in de mate waarin modelvoorspellingen overeenkomen met in werkelijkheid gemeten gegevens
8. Evaluatie fase	- eindoordeel over functioneren eventueel: modelaanpassing (terug naar fase 4)

De ontwikkeling van het blootstellingsmodel AirPEX bevindt zich bij het schrijven van dit rapport in de afronding van fase 4: de implementatie.

#### 1.4. Doelstelling en eisen.

Het beoogde gebruik van het model voor risico-schattingsdoeleinden stelt een aantal specifieke eisen aan het blootstellingsmodel. De blootstellingsmodellen die in de laatste decade in de V.S. ontwikkeld zijn voldoen niet aan (een aantal van) deze eisen (zie hoofdstuk 3). Het voorliggende onderzoek is gericht op de ontwikkeling van een blootstellingsmodel voor luchtverontreinigingen, gebaseerd op de hierna geformuleerde doelstelling, en op het specificeren en inventariseren van de vereiste inputgegevens voor het model.

#### 1.4.1. Doelstelling.

De algemene doelstelling van dit onderzoek is het ontwikkelen van een instrument dat behulpzaam is bij de kwantificering van gezondheidsrisico's door luchtverontreinigingen en bij de evaluatie van gezondheidsrisico's in relatie tot de causale verbanden.

Meer specifiek is de doelstelling het ontwikkelen van een van een model waarmee:

1. kwantitatieve schattingen zijn te genereren van de werkelijke blootstelling en geïnhaleerde dosis van (groepen van) de (Nederlandse) bevolking aan luchtverontreiniging.
2. het effect van beleidsadviezen en -maatregelen, alsmede trends in luchtkwaliteit, op de feitelijke blootstelling en geïnhaleerde dosis van de bevolking zijn te evalueren.

#### 1.4.2. Eisen.

Het beoogde gebruik van het model voor risicoschattingvragen stelt een aantal eisen aan het blootstellingsmodel:

*Eis 1: Het model moet algemeen toepasbaar zijn, onafhankelijk van de luchtverontreinigende stof en het geografisch gebied.*

Voor zover de demografie en de luchtkwaliteit van een gebied bekend zijn, moet het mogelijk zijn met het model voor een verontreinigende stof de bevolkingsblootstelling te berekenen.

*Eis 2: Het model moet als output een brede verzameling blootstellingsparameters kunnen berekenen voor (subpopulaties van) de populatie, die rechtstreeks gebruikt kunnen worden bij risico-analyses.*

Het gebruik van het model voor risicoschattingvraagstellingen vraagt een brede range van wenselijke outputparameters zoals:

- de overschrijdingen van een luchtkwaliteitsnorm gerelateerd aan bevolkingsdichtheid,
- de verdeling van de bevolking over blootstelling- en dosisparameters; bijvoorbeeld verschillende middelingstijden, cumulatieve parameters, maxima van lopende gemiddelden, etc.

*Eis 3: De variabelen van het model moeten goed manipuleerbaar zijn en moeten variabiliteit en/of onzekerheden kunnen weergeven.*

De evaluatie van beleidsmaatregelen en het kunnen doorrekenen van scenario's vereisen manipuleerbare variabelen die een reële weergave geven van de werkelijke situatie, bijvoorbeeld door middel van het gebruik van stochastische methoden en/of verdelingsfuncties voor variabelen.

*Eis 4: Het model moet mogelijkheden bieden om individuen of bevolkingskenmerken te identificeren uit berekende populatieverdelingen van blootstelling of dosis.*

In de uiteindelijke berekende populatie-blootstelling moeten de individuen te identificeren zijn, zodat meer inzicht wordt verkregen in de factoren die hoge blootstellingen veroorzaken.

*Eis 5: Het model moet flexibel zijn in het gebruik van inputgegevens.*

Omdat niet altijd even volledige en betrouwbare inputgegevens beschikbaar zijn, moet het model op flexibele wijze van de beschikbare gegevens gebruik kunnen maken.

*Eis 6: Het model moet praktisch, functioneel en flexibel zijn, en een goede grafische weergave bieden.*

Het model moet bij voorkeur geschikt zijn voor personal computer, overzichtelijk van opbouw, en gebruikersvriendelijk. Een goede grafische weergave van de resultaten, naast een weergave in tabelvorm, vergroot het inzicht in blootstellingspatronen.

Het model moet eenvoudig uitbreidbaar zijn met bijvoorbeeld blootstellings-respons relaties. Een modulaire opbouw is gewenst, zodat onderhoud en uitbreiding eenvoudig uitvoerbaar blijft.



## 2. Bestaande modellen

### 2.1. Inleiding.

Als basis voor de modelontwikkeling is een literatuuronderzoek uitgevoerd naar de bestaande blootstellingsmodellen. Deze modellen zijn geanalyseerd aan de hand van de in paragraaf 1.4.2. geformuleerde eisen. Een selectie is gemaakt naar modellen die populatieblootstelling en/of dosis berekenen voor luchtverontreinigende stoffen met over de dag fluctuerende concentratieprofielen. Deze modellen maken alle gebruik van tijdsafhankelijke activiteitenpatronen (ook wel activiteitenprofielen genoemd) van de bevolking. De geselecteerde modellen zijn

NEM: National Ambient Air Quality Standards Exposure Model (Johnson et al., 1981; Paul et al. 1986) voor ozon en PM10 (deeltjesvormige luchtverontreiniging),

SHAPE: Simulation of Human Air Pollution Exposure (Ott, 1984; Ott et al., 1988) voor koolstofmonoxide,

REHEX: Regional Human Exposure Model (Winer et al., 1989) voor ozon, stikstofdioxide, en PM10, en

PNEM: Probabilistic version of NEM (Johnson et al., 1990) voor ozon.

Van elk model wordt een beknopte beschrijving van de gebruikte methodes gegeven.

Onderzocht is in hoeverre elk model aan de gestelde eisen voldoet. De eisen t.a.v. praktische bruikbaarheid en gebruikersvriendelijkheid konden veelal niet worden getoetst met de beschikbare literatuurgegevens. Voor een vollediger beschrijving van deze modellen wordt verwezen naar bijlage I.

### 2.2. NEM.

NEM is ontworpen om het effect van alternatieve luchtkwaliteits-normen (National Ambient Air Quality Standards) op de blootstelling van de Amerikaanse bevolking te analyseren. NEM is een volledig deterministisch model dat de blootstelling van de bevolking berekent uit de bewegingen van bevolkingsgroepen door gebieden en ruimtes met verschillende luchtkwaliteit. Voor elke cohort (bevolkingsgroep) worden de bewegingen weergegeven door een "standaard activiteitenpatroon", dat gebaseerd is op een gemeten gemiddeld activiteitenpatroon. Concentraties in micro-omgevingen worden berekend uit de gemeten buitenluchtconcentraties met behulp van vaste I/O ratio's (verhouding in concentratie binnen/buiten).

Het gebruikte standaard activiteitenpatroon is een cohort-gemiddelde, en heeft als nadeel dat de werkelijke zeer grote variabiliteit van activiteitenpatronen van de gehele bevolking hierin niet tot uitdrukking komt. Extremen in gedrag die een extreme blootstelling tot gevolg hebben, zijn niet weergegeven in standaard activiteitenpatronen. Een ander bezwaar van standaard activiteitenpatronen is het ontbreken van objectieve criteria om

activiteitenpatronen te selecteren als "standaard", en populatiekenmerken te selecteren voor een cohort (= groep met identieke activiteitenpatronen). Selectie van tevoren herkende groepen met hoge blootstelling verhindert bovendien de identificatie van risicogroepen die niet zo voor de hand liggen en daarom niet als cohort herkenbaar zijn. Hiermee voldoet het model niet aan eis 4.

NEM is ontworpen als stofspecifiek en geografisch vastgelegd model, en voldoet daarmee niet aan eis 1. Onduidelijk is of het model aanpasbaar is om aan deze eis tegemoet te komen. NEM berekent een beperkt aantal blootstellingsgegevens (geen dosis) die bovendien sterk gericht zijn op de wettelijk geformuleerde luchtkwaliteitsnormen, en voldoet daarmee niet aan eis 2. NEM is geschikt voor de analyse van alternatieve luchtkwaliteitsnormen, maar doordat het model volledig deterministisch is en de meeste variabelen slecht te manipuleren zijn, voldoet NEM aan eis 3. Er zijn geen aanwijzingen dat NEM op flexibele wijze inputgegevens gebruikt (eis 5). Het is niet bekend hoe het model geïmplementeerd is, en of een grafische weergave aanwezig is (eis 6).

### 2.3. PNEM.

PNEM is de verbeterde probabilistische versie van NEM. Het model bevat een aantal stochastische elementen in de algoritmes voor activiteitenpatronen, ventilatiegedrag, ozonconcentraties in de verschillende micro-omgevingen en ademvolumes. PNEM berekent naast blootstelling ook geïnhaleerde dosis.

De meeste nadelen van NEM, zoals een beperkt aantal bevolkingsgroepen met standaard activiteitenpatronen en slechte flexibiliteit, blijven echter ook voor PNEM gelden. PNEM is enigszins verbeterd ten opzichte van de outputmogelijkheden (eis 2) en geeft redelijke goede mogelijkheden de variabelen te manipuleren (eis 3). Het is niet bekend hoe het model geïmplementeerd is, en of een grafische weergave aanwezig is (eis 6).

### 2.4. SHAPE

SHAPE is een volledig stochastisch model, dat zowel de concentraties in de micro-omgevingen als de activiteitenpatronen op stochastische basis simuleert. Concentraties in micro-omgevingen zijn een weergave van de in werkelijkheid gemeten variabiliteit in concentratiewaarden. SHAPE simuleert het individuele activiteitenpatroon voor één dag volgens vaste regels. Dit geeft een betere weergave van de werkelijke variabiliteit in activiteitenpatronen dan de weergave met standaard activiteitenpatronen. Echter, ook deze methode kent aanzienlijke beperkingen. Door de complexiteit van de werkelijke activiteitenpatronen is het noodzakelijk meerdere niet verifieerbare aannames te maken, zoals: iedereen verplaatst zich vier maal per dag per auto, trein, fiets e.d., en iedereen luncht gedurende 40 minuten. Een extra probleem vormen de vele onderlinge afhankelijkheden van activiteiten: wie met de fiets naar zijn werk gaat zal meestal ook per fiets teruggaan.

SHAPE is beperkt tot werkende volwassenen, het model is (door de simulatie van activiteitenpatronen) niet eenvoudig toepasbaar voor de gehele bevolking, en hoewel meerdere outputparameters mogelijk zijn, wordt geen schatting gemaakt van dosis (voldoet niet aan eis 2). SHAPE is weinig flexibel: de blootstellingsduur is gefixeerd op een dag, en het model heeft als input concentratieverdelingen van alle micro-omgevingen nodig (voldoet niet aan eis 5). Het model biedt echter veel mogelijkheden om variabelen te manipuleren, en daarmee mogelijkheden voor beleidsevaluaties en scenario-studies (voldoet aan eis 3). SHAPE is echter zeer gespecialiseerd en sterk stofafhankelijk, en voldoet daarmee niet aan eis 1. Het is niet bekend hoe het model geïmplementeerd is, en of een grafische weergave aanwezig is (eis 6).

## 2.5. REHEX

REHEX is ontworpen voor de beschrijving van de blootstelling en dosis van de populatie van "California's South Coast Air Basin" aan luchtverontreinigende stoffen. Het model gebruikt dezelfde methode als NEM, waarbij de grootste bezwaren van NEM zijn vermeden. REHEX gebruikt verdelingen van buitenluchtconcentraties, onderscheid een beperkt aantal micro-omgevingen, gebruikt grote verzameling standaard activiteitenpatronen voor een aantal bevolkingsgroepen, en berekent de dosis.

REHEX heeft dezelfde nadelen als NEM ten aanzien van de stofafhankelijkheid (eis 1), en identificatie van risico-groepen (eis 4). REHEX voldoet redelijk tot goed aan eis 2, de outputmogelijkheden, en biedt beperkte mogelijkheden om de parameters te manipuleren voor scenario-studies (eis 3). REHEX geeft een betere weergave van de variabiliteit van de activiteitenpatronen dan het NEM, maar de gebruikte methode blijft de nadelen behouden die behorende bij "standaard activiteitenpatronen". Bovendien vergt deze methode een zeer grote reken capaciteit (Cray-supercomputer), waarmee het model weinig flexibel in aanpassing en gebruik is (eis 6).

## 2.6. Conclusies

In tabel 1 is een overzicht gegeven in hoeverre de verschillende modellen aan de eisen voldoen.

In het algemeen geldt, dat geen van de bestaande modellen aan alle gestelde eisen voldoet. Aan de eisen 2 en 3 wordt door een aantal modellen (redelijk) voldaan.

Het ontwerp en de gebruikte methoden zijn duidelijk toegespitst op de verschillende, zeer specifieke vraagstellingen. Het grootste onderscheid tussen de modellen, en hiermee blinkbaar het grootste knelpunt, is de wijze waarop de variabiliteit in activiteitenpatronen van de bevolking wordt weergegeven. De methode die "standaard activiteitenpatronen" gebruikt lijkt zinvol wanneer onvoldoende gegevens over de activiteitenpatronen beschikbaar zijn, zodat een eerste indicatie van de relatieve bijdrage van activiteitenpatronen op

de blootstelling en dosis verkregen kan worden. Een betere methode is het gebruik van werkelijk geregistreeerde activiteitenpatronen van een voldoende grote steekproef, representatief voor de populatie. Deze methode, die door de bestaande modellen niet toegepast wordt, is echter volledig afhankelijk van de beschikbaarheid en het formaat van de inputgegevens.

**Tabel 1. Overzicht van mate waarin modellen aan eisen voldoen**

(+: goed; +/-: redelijk; -: slecht; ?: onbekend)

Eis	NEM	PNEM	SHAPE	REHEX
1. onafhankelijk	-	-	-	-
2. brede range output	-	+/-	+/-	+
3. manipuleerbare variabelen	-	+	+	+/-
4. individuen identificeerbaar	-	-	-	-
5. flexibele input	-	-	-	-
6. praktisch, flexibel	?	?	?	-

Geen van de modellen biedt de mogelijkheid om de "upper tails" van de populatieblootstellingsverdelingen te identificeren naar individuele kenmerken (eis 4). Alle modellen zijn stofafhankelijk ontwikkeld, sommige zijn aangepast voor enkele andere componenten, maar de flexibiliteit in deze is niet duidelijk. Hoewel geen van de modellen voldoende outputmogelijkheden biedt (eis 2), bieden ze gezamenlijk een brede verzameling van outputparameters, die behulpzaam zijn bij het definiëren van de outputmogelijkheden van het te ontwikkelen blootstellingsmodel.

### 3. Blootstelling

#### 3.1. Algemeen.

In dit hoofdstuk worden de gebruikte definities en mathematische beschrijvingen van blootstelling en dosis gegeven, die als basis gebruikt worden in hoofdstuk 4: de beschrijving van het model AirPEX.

De terminologie en de definities van grootheden die bij de karakterisering van de blootstelling aan stoffen worden gebruikt, worden in vakkringen niet eenduidig gehanteerd. In 1993 is een internationale werkgroep in het leven geroepen om het hanteren van uniforme definities van de in het vakgebied gebruikte grootheden te bevorderen (Nomenclature Database, Committee International Society of Exposure Analysis).

Blootstelling wordt meestal gedefinieerd als het contact van een stof met een ontvankelijk oppervlak van het menselijke lichaam, waarbij geen rekening wordt gehouden met de duur van het contact (Duan, 1982; Ott, 1985). Liroy (1990) spreekt in zijn definitie over meerdere ontvankelijke oppervlakken en voegt de tijdsduur toe. Ook in de "US-EPA Guidelines for Exposure Assessment" (1992) wordt blootstelling gedefinieerd als een momentopname, het contact van een stof met de buitenste grenslaag van het lichaam, waarbij wordt gesteld dat voor het kwantificeren van de blootstelling de tijdsduur van het contact van belang is. De concentratie van de stof, de frequentie en de duur van het contact, en de snelheid waarmee de grenslaag wordt overschreden, bepalen de dosis van de stof.

#### 3.2. Grootheden van blootstelling en geïnhaleerde dosis.

In deze paragraaf worden de grootheden gedefinieerd en afgeleid, die bij de beschrijving van de inhalatoire blootstelling van individuen en populaties worden gebruikt.

De concentratie van een luchtverontreinigende stof is gedefinieerd als de massa of het volume-aandeel van de stof per volume-eenheid lucht en is een functie van tijd en plaats. De regionale achtergrondconcentratie  $C_r$  is de op basis van meetgegevens en fysische en chemische processen gemodelleerde concentratie in een gebied waarbinnen de achtergrondconcentratie onafhankelijk van de plaats wordt verondersteld. Binnen een regio wordt een onderverdeling gemaakt in gebieden met concentraties die afwijken van de regionale achtergrondconcentratie. De concentratie  $C_a$  in de zgn. macro-omgevingen  $a$ , zoals stedelijke gebieden en het platteland, wordt beschreven als een functie  $f_a$  van  $C_r$  behorend bij de regio waarin  $a$  is gelokaliseerd:

$$C_a(t) = f(C_r(t), a) = f_a(C_r(t)) \quad (1)$$

Binnen elke macro-omgeving wordt onderscheid gemaakt in zogenaamde micro-omgevingen, waarin een concentratie heerst die afwijkt van de concentratie in de macro-omgevingen, zoals (drukke) straten, gebouwen en vervoermiddelen. Voor een stof die alleen in de buitenlucht wordt gevormd of daarin rechtstreeks wordt geëmitteerd, geldt dat de concentratie in de micro-omgeving een functie  $f_j$  is van de concentratie in de macro-omgeving en van de aard van de micro-omgeving  $j$ :

$$C_j(t) = f(C_a(t), j) = f_j(f_a(C_r(t))) \quad (2)$$

De grootte  $C_j(t)$  beschrijft de concentratie als functie van de tijd  $t$  in micro-omgeving  $j$  binnen macro-omgeving  $a$  gelegen in de regio  $r$ . In vergelijking 2 is  $f_j$  alleen afhankelijk van de aard van de micro-omgeving verondersteld. De functie bevat echter ook de bijdragen van o.a. de meteorologische omstandigheden en het gedrag van de aanwezige personen. Beide functies,  $f_a$  en  $f_j$ , zijn afhankelijk van de luchtverontreinigingscomponent. Bij de beschrijving van de blootstelling van een individu wordt onderscheid gemaakt tussen de potentiële blootstelling  $P$  en de werkelijke blootstelling  $E$ , kortweg de blootstelling genoemd. De potentiële blootstelling  $P$  van een individu  $i$  aan de stof is gedefinieerd als de concentratie in de macro-omgeving waarin  $i$  zich bevindt:

$$P_i(t) = C_a(t) \quad (3)$$

Blootstelling  $E$  wordt gedefinieerd als de concentratie die tijdens het contact met de stof aan de grenslaag - c.q. mond en neus - heerst, derhalve de concentratie in de micro-omgeving  $j$  waar het individu  $i$  zich bevindt:

$$E_i(t) = C_j(t) \quad (4)$$

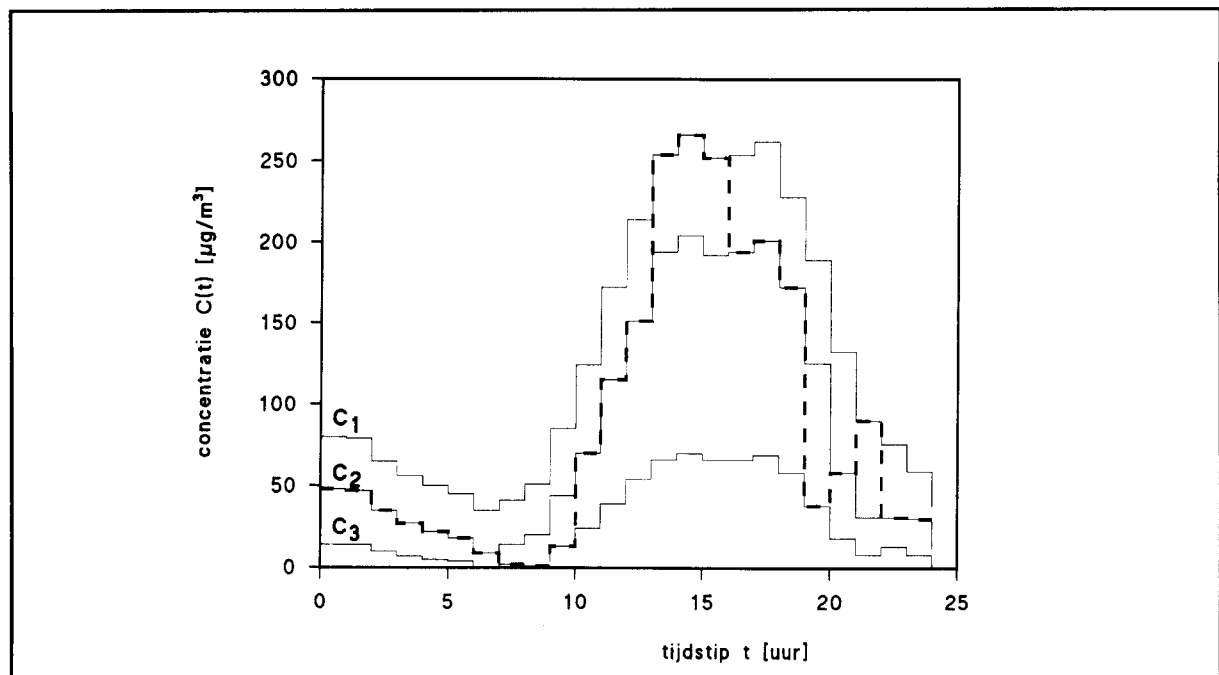
en, volgens de vergelijkingen 1 en 3:

$$E_i(t) = f_j(C_a(t)) = f_j(P_i(t)) \quad (5)$$

$E_i(t)$  beschrijft de blootstelling van een individu als functie van  $t$ , het zogenaamde blootstellingsprofiel.

In figuur 3 zijn de profielen van de luchtkwaliteit in drie micro-omgevingen  $j$  gegeven, uitgaande van een macro-omgeving  $a$  (niet weergegeven) met een concentratieprofiel gelijk aan het profiel van micro-omgeving 1 (de buitenlucht).

Een individu  $i$  beweegt zich gedurende de beschouwde periode door deze micro-omgevingen. Dit wordt weergegeven door de gestippelde lijn, die bij wisseling van micro-omgeving naar het bijbehorende profiel overspringt. Deze lijn geeft derhalve het profiel



Figuur 3. De drie concentratie profielen in micro-omgevingen 1 (de buitenlucht), 2 (binnenshuis), en 3 (in de auto), en het blootstellingsprofiel van persoon  $i$  (gestippelde lijn).

van de werkelijke blootstelling  $E_i$  weer. De hier gebruikte informatie over de gang van het individu door de micro-omgevingen wordt verkregen uit de individuele activiteitenprofielen  $A_i(t)$ . Hierin is een voor de populatie representatief bestand van individuele gegevens over tijdbesteding opgenomen, zowel de plaats en het type micro-omgeving waar persoon  $i$  zich op tijdstip  $t$  bevindt als de soort activiteit wat wordt verricht en het bijbehorende inspanningsniveau. Daarnaast zijn in dit bestand de individuele kenmerken als woonplaats, leeftijd, geslacht, e.d. opgenomen.

De massa van een component die, door inademing van de lucht waaraan men wordt blootgesteld, per tijdseenheid wordt geïnhaleerd, wordt de dosissnelheid  $\dot{D}$  genoemd (ook wel "dose-rate" genoemd).

$\dot{D}$  is het produkt van de inademingsvolumestroom  $\dot{V}_i$  i.e. het ingeademde volume lucht per

tijdseenheid, en de concentratie van de stof in de inademingslucht c.q. de blootstelling E:

$$\dot{D}_i(t) = E_i(t) * \dot{V}_{I,i}(t) \quad (6)$$

$\dot{V}_{I,i}(t)$  wordt afgeleid uit het profiel van de inspanningsniveaus uit het activiteitenprofiel  $A_i(t)$ . De massa die in een bepaald tijdsinterval  $\Delta t$  wordt ingeademd, de geïnhaleerde dosis, wordt verkregen door vergelijking 6 te integreren:

$$D_{i,\Delta t}(t) = \int_t^{t+\Delta t} \dot{D}_i(t) dt = \int_t^{t+\Delta t} (E_i(t) * \dot{V}_{I,i}(t)) dt \quad (7)$$

De onderscheiden individuele profielen  $P_i(t)$ ,  $E_i(t)$  en  $\dot{D}_i(t)$  zijn weergegeven als een continue functie van de tijd  $t$ . In werkelijkheid zijn de profielen die als invoer voor het model dienen ( $C_i(t)$  en  $\dot{V}_{I,i}(t)$ ) discontinu. De luchtkwaliteitsgegevens zijn veelal gewogen over een zekere tijd  $\tau_{LK}$  die wordt bepaald door de gebruikte meetmethoden en/of door de fenomenologie van de betreffende stof. Ook in de activiteitenprofielen  $A_i(t)$  wordt een minimum tijdstap  $\tau_A$  toegepast, i.e. de kortste tijd waarvoor informatie over activiteit en tijdsbesteding bekend is. Het tijdsoplossend vermogen  $\tau$  bij het berekenen van de blootstellingsparameters, is gelijk aan de kleinste van de twee die in beide invoerstanden is toegepast. Alle gebruikte invoervariabelen worden derhalve over een periode  $\tau$  constant verondersteld. De profielen van de potentiële en werkelijke blootstelling van een individu  $i$  (vergelijkingen 3 en 4) worden dan beschreven door:

$$P_{i,\tau}(t) = C_{a,\tau}(t) \quad (8)$$

en:

$$E_{i,\tau}(t) = C_{j,\tau}(t) \quad (9)$$

Het geïnhaleerde-dosisprofiel met tijdsoplossend vermogen  $\tau$  wordt verkregen door  $\Delta t$  in vergelijking 7 te substitueren door  $\tau$ :

$\dot{V}_{I,i}$  is constant gedurende de tijd  $\tau$  omdat  $\tau \leq \tau_A$ . Vergelijking 10 wordt dan:



$$D_{i,\tau}(t) = \int_t^{t+\tau} \dot{D}_i(t) dt = E_{i,\tau} * \int_t^{t+\tau} \dot{V}_{I,i}(t) dt \quad (10)$$

$$D_{i,\tau} = E_{i,\tau} * \dot{V}_{I,i,\tau}(t) * \tau \quad (11)$$

De voor bovenstaande berekeningen benodigde luchtkwaliteitsgegevens zijn de gemodelleerde regionale concentratieprofielen  $C_i(t)$  en de functies waarmee de concentratieprofielen in de macro- en micro-omgevingen kunnen worden gemodelleerd ( $f_a$  en  $f_j$ ). Tevens zijn algemene demografische gegevens van de bevolking benodigd en een bestand met onder meer individuele activiteitenprofielen  $A_i(t)$  met gegevens over verblijfplaats (macro- en micro-omgeving) en de ademsnelheid als functie van de tijd, representatief voor de door te rekenen populatie. De samenstelling van de invoerbestanden en de wijze waarop het model er gebruik van maakt bij de berekening van de onderscheiden blootstellingsparameters, is in hoofdstuk 5 gedetailleerd beschreven.

### 3.3. Relatie met effecten

In deze paragraaf wordt de relatie gelegd met blootstelling-responsmodellen verkregen uit epidemiologisch en toxicologisch onderzoek, waarmee het mogelijk wordt de blootstelling aan luchtverontreinigende stoffen en de respons in de bevolking kwantitatief te beschrijven.

Met de in 3.2. afgeleide vergelijkingen wordt de blootstelling van een individu uitgedrukt in grootheden die kunnen worden gebruikt voor het modelleren van de respons van het individu met behulp van blootstelling- en dosis-responsrelaties. Onderzoek naar de relaties tussen blootstelling aan luchtverontreiniging en de optredende effecten - de respons  $R$  - vindt plaats zowel in het veld met epidemiologische studies als in het laboratorium met humaan-klinische en dierexperimentele toxicologische studies. De blootstelling-responsrelaties verkregen uit epidemiologisch onderzoek beschrijven veelal de respons als een functie van een luchtkwaliteitparameter  $C_{LK}$ :

$$R_{EPI} = f_{EPI}(C_{LK}) \quad (12)$$

Voor het modelleren van de respons in een populatie met gebruikmaking van een relatie verkregen uit epidemiologisch onderzoek is het noodzakelijk de gemodelleerde blootstelling van die populatie uit te drukken in de luchtkwaliteitsparameter die in de gebruikte relatie met de respons is gecorreleerd. Veelal is dit de over een bepaalde tijdsduur

gemiddelde concentratie op enig tijdstip in de regio of in het stedelijk gebied. Indien, bijvoorbeeld, uit epidemiologisch onderzoek een zekere correlatie is vastgesteld tussen de respons en de over T uur gemiddelde stadsachtergrondconcentratie van een stof, kan de respons in een populatie worden gemodelleerd door uit het potentiële-blootstellingsprofiel  $P_{i,\tau}(t)$  de T-uurs gemiddelde potentiële blootstelling te berekenen:

$$P_{i,\tau}(t) = f_a (C_{r,\tau,ix}(t)) \quad (13)$$

en:

$$P_{i,T}(t) = (\tau/T) * \sum_{n=1}^{\eta\tau} (P_{i,\tau}(t_n)) \quad (14)$$

waarin  $f_a$  de relatie tussen stadsachtergrond en regionale concentratie beschrijft en onder voorwaarde dat  $T/\tau$  een geheel getal  $\geq 1$  is. De individuele respons  $R_i$  kan worden berekend met de vastgestelde blootstelling-responsrelatie  $f_{EPI}$ :

$$R_i = f_{EPI} (P_{i,T}) \quad (15)$$

De blootstelling-responsrelatie verkregen uit dierexperimenteel en humaan klinisch onderzoek  $f_{TOX}$ , worden in het algemeen beschreven door de respons als functie van de concentratie C, blootstellingsduur T en ademsnelheid  $\dot{V}_I$ :

$$R_i = f_{TOX} (C, T, \dot{V}_I) \quad (16)$$

Deze relaties kunnen in een aantal gevallen ook worden beschreven door de respons uit te drukken als functie van de geïnhaleerde dosis of de dosis-snelheid:

$$R_{TOX} = f_{TOX}(D) \quad \text{of} \quad f_{TOX}(\dot{D}) \quad (17)$$

Uit de blootstelling- en dosisprofielen worden die parameters afgeleid, waarmee met deze relaties de respons kan worden gemodelleerd. Elke relatie of model waarin de respons als functie van de concentratie c.q. de blootstelling E en de blootstellingstijd T of van de

dosis D gegeven is, kan worden toegepast. Ook bieden dergelijke causale relaties de mogelijkheid om de invloed van veranderingen in een enkele parameter op de respons te modelleren.

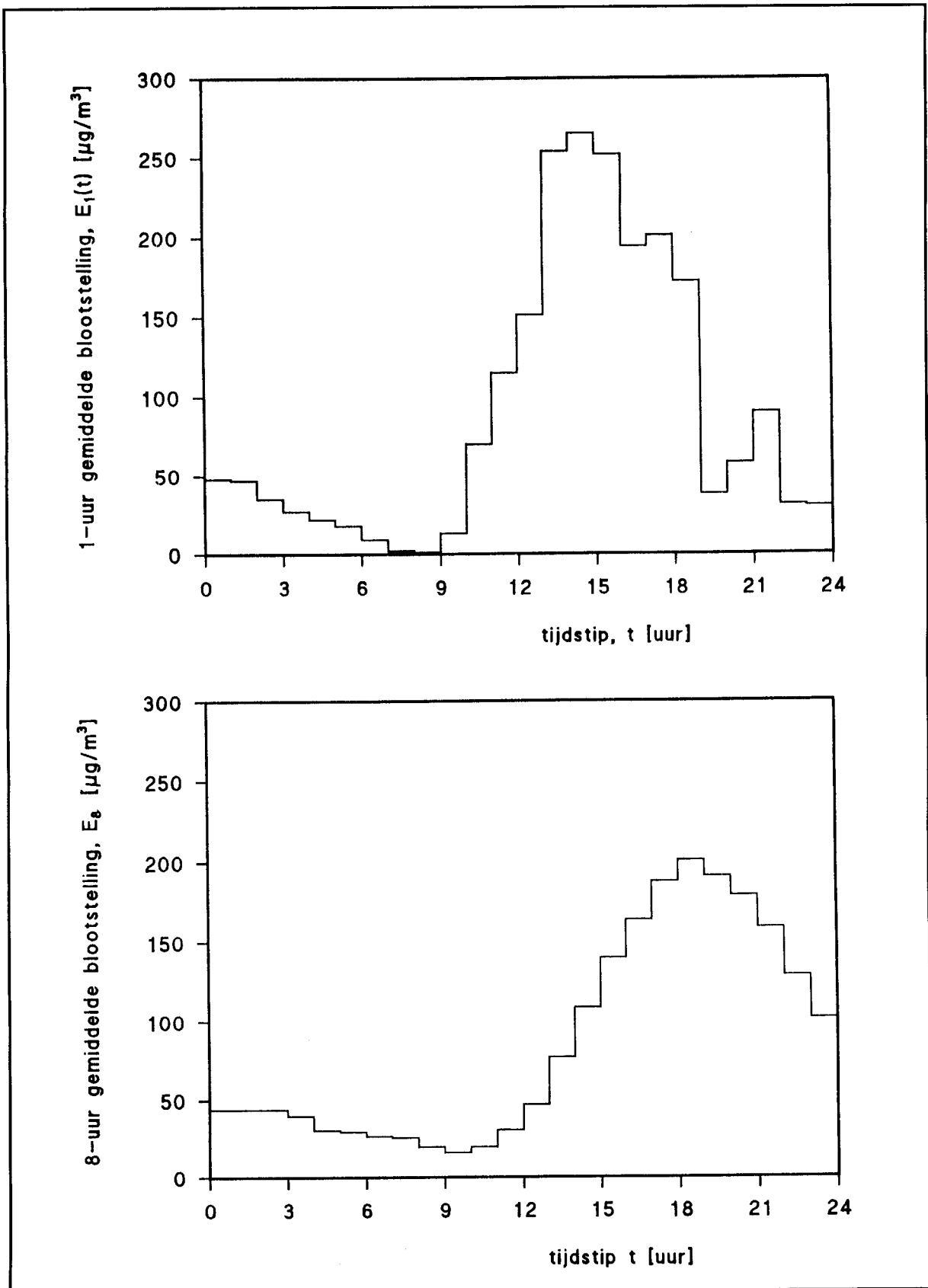
Indien, bij voorbeeld, uit toxicologisch onderzoek is vastgesteld dat een effect is gerelateerd met de maximale T-uurs gemiddelde concentratie, kan de respons in de bevolking worden gemodelleerd met de maxima van de individuele profielen van de T-uurs gemiddelde blootstelling:

$$E_{i,T}(t) = (\tau/T) * \sum_{n=1}^{\tau} (E_{i,\tau}(t_n)) \quad (18)$$

In figuur 4 zijn ter illustratie de individuele profielen  $E_i$  voor een middelingstijd van  $T = 1$  uur en  $T = 8$  uur (volgens de vergelijkingen 14 en 18) weergegeven. Hierbij is steeds per uur verschuivend over 8 uren een 8-uurs gemiddelde blootstelling berekend. De respons op basis van een relatie waarin het effect is gecorreleerd aan de totaal geïnhaleerde dosis over een periode T, waarbij  $T/\tau$  een geheel getal  $\geq 1$  is, kan worden gemodelleerd met behulp van het dosisprofiel:

$$D_{i,T} = \sum_{n=1}^{\tau} (D_{i,\tau}(t_n)) = \tau * \sum_{n=1}^{\tau} \{E_{i,\tau}(t_n) * \dot{V}_{I,i,\tau}(t_n)\} \quad (19)$$

Modellering van de blootstelling en daaruit voortvloeiende respons houdt niet op bij het beschrijven van de geïnhaleerde dosis. Uit het dosissnelheidsprofiel en het geïnhaleerde-dosisprofiel kan met behulp van modellen die mechanismen als depositie, opname, biotransformatie en toxicokinetiek beschrijven, de wijze waarop de geïnhaleerde-dosis resulteert in een zekere weefseldosis in de onderscheiden delen van de respiratoire tractus en in extra-pulmonaire compartimenten en organen worden beschreven. Vervolgens is het mogelijk om met modellen die de respons beschrijven als functie van de weefseldosis beschrijven, de effecten te modelleren. Dergelijke modellen zijn evenwel zo stofspecifiek dat ze niet in een algemeen blootstellingsmodel kunnen worden opgenomen.



Figuur 4. (boven) Het blootstellingsprofiel  $E_i(t)$  van individu i weergegeven in figuur 3, en (onder) het daaruit berekende 8-uur gem. blootstellingsprofiel  $E_{i,8}(t)$ .

## 4. Het Air Pollution Exposure Model (AirPEX).

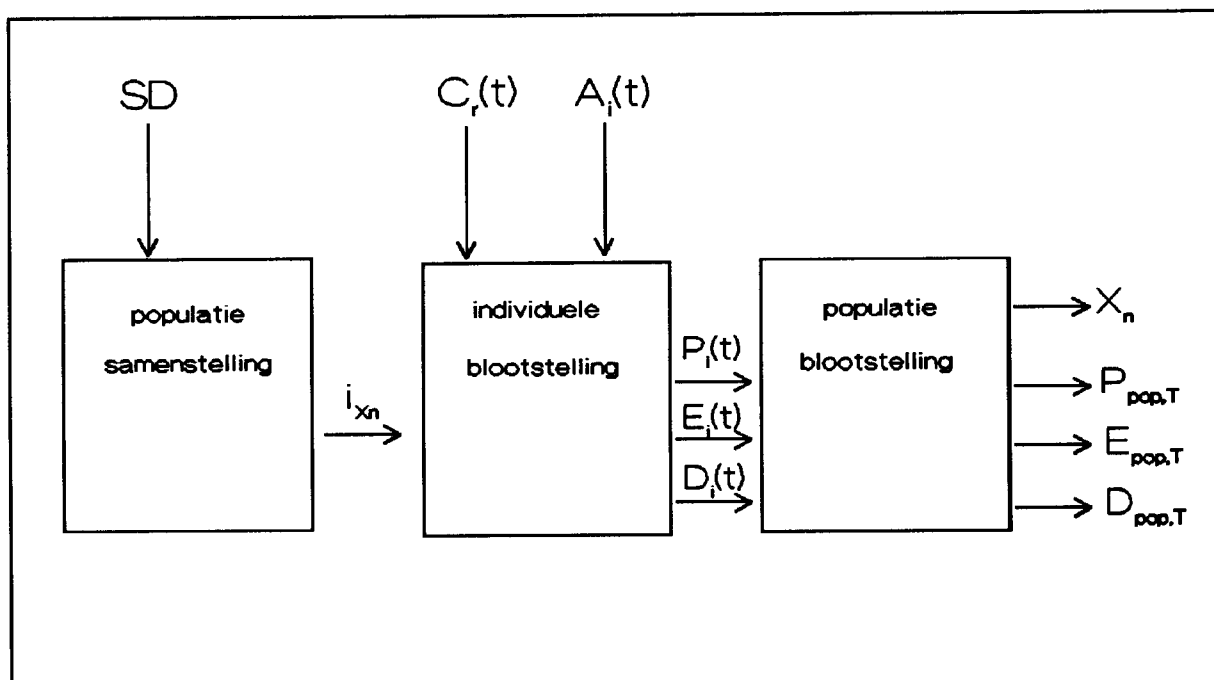
### 4.1. Modelbeschrijving

#### 4.1.1. Algemeen

In dit hoofdstuk wordt, uitgaande van de formuleringen van de blootstellingsgrootheden die in hoofdstuk 3 zijn gegeven, het blootstellingsmodel AirPEX beschreven. Eerst wordt de globale opbouw gegeven van de hoofdmodules, met de daarbij behorende inputgegevens. Vervolgens wordt ingegaan op de modelberekeningen die gebaseerd zijn op de mathematische beschrijving van blootstelling en dosis (zie hoofdstuk 3), en op de outputgegevens die kunnen worden gegenereerd. Tot slot wordt aangegeven welke keuzes zijn gemaakt met betrekking tot de implementatie van het model.

#### 4.1.2. De hoofdmodules.

Het model bestaat uit drie hoofdmodules die elk een basisonderdeel berekenen: de populatiesamenstelling, de individuele blootstelling, en de populatie-blootstelling (figuur 5). De inputgegevens voor deze modules zijn achtereenvolgens: de sociaal demografische gegevens van de populatie (SD), de regionale concentratiegegevens ( $C_r(t)$ ) en de individuele activiteitenpatronen ( $A_i(t)$ ). Achtereenvolgens wordt een populatie samengesteld, voor deze populatie de individuele blootstelling berekend, en ten slotte een of meer output



Figuur 5. De drie hoofdmodules van AirPEX, de bijbehorende inputgegevens en de per module berekende output (voor verklaring van termen zie tekst).

populatie-blootstellingen berekend. De gebruiker bepaalt voor elke module de inputvariabelen van de simulatie en de te gebruiken rekenmethodes.

In de module populatiesamenstelling wordt op basis van de gewenste populatiegrootte en populatiekenmerken een populatie gegenereerd uit de sociaal-demografische gegevens (SD) die gekarakteriseerd zijn voor een n-tal populatiekenmerken. De SD-gegevens leveren de kansverdelingen van deze populatiekenmerken. Met behulp van Monte Carlo methoden wordt voor een individu  $i$  een waarde getrokken uit elk van deze verdelingen. Door de berekening een voor groot aantal individuen te herhalen is het mogelijk een populatie te genereren die wordt beschreven door de gegeven kansverdelingen van populatiekenmerken. Op grond van de getrokken kenmerken van een individu ( $X_1 \dots X_n$ ) wordt vervolgens een activiteitenprofiel ( $A_i(t)$ ) aan individu  $i$  toegekend. Hiervoor zijn twee methoden beschikbaar: (1) voor elke combinatie van kenmerken (cohort) wordt één 'standaard activiteitenpatroon' toegekend, of (2) voor elk individu  $i$  wordt een 'werkelijk activiteiten-patroon' van een persoon met de kenmerken van  $i$  uit een database van werkelijk gemeten activiteitenpatronen toegekend.

In de module individuele blootstelling wordt voor de gewenste component, simulatieperiode en -jaar, op grond van inputgegevens over de regionale concentraties, activiteitenpatronen, en op grond van de individuele kenmerken voor elk individu  $i$  het potentiële blootstellingsprofiel  $P_i(t)$ , het blootstellingsprofiel  $E_i(t)$  en het dosisprofiel  $D_i(t)$  berekend volgens de vergelijkingen 2, 8, 9 en 11 .

In de module populatieblootstelling worden de individuele profielen bewerkt tot populatieverdelingen van de gewenste blootstellingsparameters. In deze verdelingen zijn van elk individu de individuele kenmerken  $X_n$  beschikbaar. Met een zogenaamde "backtrack"-functie is het mogelijk de factoren die verantwoordelijk zijn voor bijvoorbeeld een extreem hoge blootstelling op te sporen of te "backtracken".

#### 4.1.3. De sociaal-demografische gegevens (SD).

De sociaal-demografische inputgegevens bevatten informatie over de opbouw van de Nederlandse (of andere) bevolking ten aanzien van de momenteel gebruikte kenmerken: leeftijd ( $X_1$ ), geslacht ( $X_2$ ), werksituatie ( $X_3$ ), regio ( $X_4$ ) en urbanisatiegraad ( $X_5$ ). In de inputgegevens worden ook de onderlinge afhankelijkheden tussen kenmerken weergegeven, zoals de leeftijd per geslacht, de werksituatie per leeftijd en per geslacht en de urbanisatiegraad per regio

#### 4.1.4. Luchtkwaliteitsgegevens.

De inputgegevens over luchtkwaliteit bevatten tijdreeksen van per stof de concentraties in een aantal onderscheiden geografische gebieden (de grofste ruimtelijke schaal): de regionale concentraties  $C_r(t)$ . De grootte en ligging van de onderscheiden geografische gebieden, de regio's, zijn zo gekozen dat de grootschalige ruimtelijke variatie van de meeste stoffen in Nederland voldoende nauwkeurig te beschrijven is. Deze indeling komt overeen met 14 regio's die in het verspreidingsmodel PLUIM en het CAR-model (Baars, 1988) gedefinieerd zijn (bijlage II). De tijdstap  $\tau_{LK}$  die hierbij gebruikt wordt bepaald door de gebruikte meetmethoden en de fenomenologie van de stof.

#### 4.1.5. Activiteitenpatronen.

De inputgegevens over activiteitenpatronen bestaan uit een verzameling individuele activiteitenprofielen  $A_i(t)$ . Elk profiel is een tijdreeks van gegevens over

- de micro-omgeving  $j$  waar persoon  $i$  verblijft op tijdstip  $t$  (letterlijk: tussen  $t$  en  $t + \tau_A$ ),
- het inspanningsniveau waarmee een activiteit uitgevoerd wordt en
- het type activiteit.

Het 'standaard activiteitenprofiel' is een tijdreeks waarin deze gegevens per bevolkingsgroep, per seizoen en per dagtype (weekenddag of door-de-weekse-dag) zijn beschreven. Hierbij wordt vanwege de aard van de gegevens gewoonlijk een tijdstap  $\tau_A$  van 10 minuten tot 1 uur aangehouden.

## 4.2. Modellerings van potentiële en werkelijke blootstelling

Het profiel van de potentiële blootstelling  $P$  voor individu  $i$  is in paragraaf 4.2. gedefinieerd als de concentratie in de macro-omgeving waarin een persoon zich bevindt:

$$P_i(t) = C_a(t) \quad (8)$$

Afhankelijk van de stof kunnen de concentraties binnen de macro-omgevingen  $C_a$  sterk afwijken van de regionale concentratie  $C_r$ . De functie  $f_a$  beschrijft het verband tussen  $C_r$  en  $C_a$ :

$$f_a: C_a(t) = k_a * C_r(t)^{l_a} + m_a \quad (20)$$

waarin  $k_a$ ,  $l_a$  en  $m_a$  variabelen zijn die afhankelijk zijn van onder meer de aanwezigheid en sterkte van lokale bronnen, afbraak, depositie, reacties met andere (geëmitteerde) stoffen en de weersgesteldheid. In het model wordt bij gebrek aan voldoende (meet)gegevens

voor deze variabelen constante waarden gebruikt, die zijn afgeleid uit metingen van de luchtkwaliteit in de onderscheiden macro-omgevingen.

Uit de vergelijkingen 8 en 20 volgt:

$$P_i(t) = k_a * C_r(t)^{l_a} + m_a \quad (21)$$

Het blootstellingsprofiel  $E(t)$  van  $i$  is in paragraaf 3.1. gedefinieerd als de concentratie in de micro-omgeving  $j$  waar  $i$  zich bevindt:

$$E_i(t) = C_j(t) \quad (9)$$

De functie  $f_j$  beschrijft het verband tussen de concentratie in de micro-omgeving  $C_j$  en die daarbuiten  $C_a$ :

$$f_j: C_j(t) = k_j * C_a(t)^{l_j} + m_j \quad (22)$$

waarin  $k_j$ ,  $l_j$  en  $m_j$  variabelen zijn die afhangen van het ventilatievoud, het volume van  $j$ , eventuele emissies, afbraak, en dergelijke. In het model wordt  $l_j = 1$  verondersteld.

Voor  $k_j$  en  $m_j$  worden constanten gebruikt, waarvan de waarden uit voor elk type micro-omgeving gedefinieerde waarschijnlijkheidsverdelingen van  $k_j$  en  $m_j$  worden getrokken.

De blootstelling  $E$  wordt nu:

$$E_i(t) = k_j * C_a(t)^{l_j} + m_j \quad (23)$$

#### 4.3. Modelling van de geïnhaleerde dosis

Het profiel van de over de middelingstijd  $\tau$  geïntegreerde geïnhaleerde dosis is in paragraaf 3.2. gedefinieerd als het produkt van de concentratie c.q. de werkelijke blootstelling  $E$  en het volume lucht dat per tijdseenheid wordt ingeademd  $\dot{V}_i$ :



$$D_i(t) = E_i(t) * \dot{V}_{I,i}(t) * \tau \quad (11)$$

Gegevens over het geïnhaleerde volume  $V_I$  zijn in het algemeen niet bekend. Wel zijn gegevens beschikbaar over het ademvolume gedefinieerd als het volume lucht dat per ademhaling (het "tidal" volume  $V_T$ ) respectievelijk per tijdseenheid (de ademsnelheid  $\dot{V}_E$ ) wordt uitgeademd, omgerekend naar droog volume en standaard temperatuur en druk en over de ademfrequentie  $f$ :

$$\dot{V}_E = V_T * f \quad (24)$$

Het volume lucht dat per tijdseenheid wordt ingeademd ( $\dot{V}_I$ ) moet worden afgeleid door de beschikbare gegevens over  $\dot{V}_E$  te corrigeren voor temperatuur, druk en vochtigheid van de ingeademde lucht:

$$\dot{V}_I = c_{STPD} * \dot{V}_E \quad (25)$$

In het model wordt  $\dot{V}_E$  geschat op basis van empirische relaties tussen  $\dot{V}_E$  (in  $l \cdot \text{min}^{-1}$ ) en lichaamsgewicht  $M$  (in kg) tijdens de slaap en in rust (Kleinman, 1989):

$$\begin{aligned} \dot{V}_{E, \text{sleep}} &= 0,40 * M^{0,67} \\ \dot{V}_{E, \text{rest}} &= 0,39 * M^{0,75} \end{aligned} \quad (26)$$

De  $\dot{V}_E$  tijdens lichte, matige en zware inspanning wordt gebruik gemaakt wordt door Kleinman als volgt gedefinieerd met vaste verhoudingen met  $\dot{V}_{E, \text{rest}}$ :

$$\begin{aligned} \dot{V}_{E, \text{light}} &= 2 * \dot{V}_{E, \text{rest}} \\ \dot{V}_{E, \text{moderate}} &= 4 * \dot{V}_{E, \text{rest}} \\ \dot{V}_{E, \text{heavy}} &= 6 * \dot{V}_{E, \text{rest}} \end{aligned} \quad (27)$$

Door de andere definitie van inspanningsniveaus in de gebruikte activiteitenpatronen (zie bijlage III ) zijn in het AirPEX de  $\dot{V}_E$  tijdens lichte, matige en zware inspanning als volgt gedefinieerd:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{E,weinig} &= \dot{V}_{E,rest} \\ \dot{V}_{E,matig} &= 2 * \dot{V}_{E,rest} \\ \dot{V}_{E,inspan.} &= 5 * \dot{V}_{E,rest} \end{aligned} \tag{28}$$

In bijlage III zijn een aantal veel voorkomende soorten van activiteiten geclassificeerd volgens deze inspanningsniveaus.

Van het individu i wordt op basis van de leeftijdscategorie een waarde getrokken uit een verdeling van het lichaamsgewicht M, met voor elke categorie een onder- en bovengrens zie tabel 2 (US-EPA, 1987). Hierbij wordt voor elke leeftijdscategorie een uniforme verdeling van lichaamsgewicht verondersteld.

**Tabel 2: Grenzen van lichaamsgewicht per leeftijdscategorie**

leeftijdscategorie	M <sub>ondergrens</sub> [kg]	M <sub>bovengrens</sub> [kg]
0-4 jr	3,5	20
5-9 jr	20	35
10-19 jr	35	70
20+ jr	70	70

Met de vergelijkingen 25, 26 en 28 en gegevens over de activiteit die het individu i uitvoert uit het activiteitenprofiel  $A_i(t)$  wordt  $\dot{V}_I$  berekend. Hierna wordt het profiel van de geïnhalerde dosis berekend:

$$D_i(t) = E_i(t) * \dot{V}_{I,i}(t) * \tau \tag{11}$$

#### 4.4. Outputparameters

Uit de gemodelleerde individuele profielen van de potentiële en werkelijke blootstelling en de geïnhaleerde dosis moeten blootstellingsparameters worden afgeleid, waarmee aan de doelstellingen voor het gebruik van het model wordt voldaan. De uitvoer moet derhalve geschikt zijn om inzicht te verschaffen in de relaties tussen enerzijds de blootstellings- of dosisparameters en anderzijds luchtkwaliteitsparameters, tijdsvariabelen als datum en middelings- en integratietijden, individuele en populatiekenmerken, inclusief geografische kenmerken en activiteitenpatronen. Het model biedt hier tal van mogelijkheden voor, waarvan er in deze paragraaf een aantal worden uitgelicht. De meest gebruikelijke uitvoerwijze wordt verkregen door het model een verdeling van de gekozen uitvoerparameter over de geselecteerde populatie te laten genereren. Daarnaast bestaat de mogelijkheid om de uitvoerparameter als functie van de tijd weer te geven. Ten slotte kan met de *backtrack*-functie een geselecteerd deel van de gegenereerde populatieverdeling nader worden geïdentificeerd op individuele kenmerken.

Met de keuzes van de toe te passen methoden en met de in te stellen variabelen en selectiecriteria (tabel 3) wordt de rekenwijze en de presentatie van de uitvoerparameters gedefinieerd, zoals:

- de verdeling over (een deel) van de bevolking van de gemiddelde, maximale of cumulatieve blootstelling en dosis over een gekozen periode;
- de verdeling over een populatie van de verschuivende over  $n$  uur ( $\tau \leq n \leq 24$ ) gemiddelde blootstelling of dosis.

Deze verdelingen kunnen weergegeven worden als frequentie-verdeling en als geïnverteerde cumulatieve verdeling.

Naast de verschillende blootstellings- en dosisgegevens biedt het model tevens de mogelijkheid om een aantal van de uit luchtkwaliteitinput afgeleide gegevens te berekenen. Deze gegevens kunnen behulpzaam zijn bij het verkrijgen van inzicht in de fenomenologie van de luchtkwaliteit en de potentiële blootstelling. Het model kan bijvoorbeeld de volgende parameters zichtbaar maken:

- het verloop over een gekozen periode (dag...jaar) van de daadwerkelijk gemeten maximale of gemiddelde concentraties met toepassing van verschillende middelingstijden in de onderscheiden regio's;
- de overschrijdingen van een gekozen concentratieniveau in een bepaalde periode;
- een overzicht van de omvang van episodes met verhoogde concentratieniveau's;
- de verdeling van de potentiële blootstelling over de bevolking;
- de verdeling van overschrijdingen van een bepaalde blootstelling over de bevolking; etc.

Ter illustratie wordt in hoofdstuk 6 een voorbeeld gegeven van een aantal outputparameters die de blootstelling van de Nederlandse bevolking aan ozon beschrijven.

**Tabel 3: Overzicht instellingsmogelijkheden van variabelen.**

methode, variabele, criteria	mogelijkheden in AirPEX 1.0
component	ozon, deeltjesvormige luchtverontr. (PM <sub>10</sub> ...
jaar, begindag en duur van de simulatie	afhankelijk van component; 1989...1992, 1...365 dagen
populatie-omvang	1...10000 ...
populatie-selectiecriteria	woonplaats, geslacht, leeftijd, ...
activiteitenpatroon	standaard, werkelijk
macro- en micro-omgeving-functies	afhankelijk van component; normaal, lognormaal of uniform verdeelde variabelen
outputparameter	concentratie, (potentiële) blootstelling, geïnhaleerde dosis
bewerking outputparameter	cumulatief, gemiddeld, maxima
weergave outputparameter	tijdsafhankelijk, verdelingsfunctie, overschrijdingsfunctie
middelingstijd T	15 minuten ... 24 uur ...

#### 4.5. Implementatie.

De vele eisen die aan het model gesteld worden met betrekking tot de flexibiliteit, gebruikersvriendelijkheid, en onderhoud leiden tot een voor dit doel specifiek geprogrammeerd model dat bij voorkeur draait op een personal computer. Met de programmeertaal Turbo Pascal for Windows (TPW) is het mogelijk aan de gestelde eisen te voldoen. TPW biedt mogelijkheden om op een doorzichtige, onderhoudsvriendelijke en efficiënte wijze te programmeren (Object Oriented Programming). TPW biedt de programmeur een efficiënte programmeeromgeving (Integrated Development Environment) met vele bestaande stukken programmatuur (Application Programming Interface) die het gebruik maken van de specifieke "Windows" eigenschappen vergemakkelijken. Daarnaast biedt TPW goede mogelijkheden voor overzichtelijke grafische weergaven, doorzichtige communicatie (Graphical User Interface) en context sensitive help-informatie.

AirPEX is met behulp van TPW ontworpen als een Windows-applicatie. Dat betekent dat het pakket volgens Windows richtlijnen ontworpen is en daarmee voor Windows gebrui-

kers snel te hanteren. Om AirPEX interactief te kunnen gebruiken bij het werken met grote populaties en langere blootstellingsperioden, is een personal computer met een 80486 processor en 8 Mb RAM geheugen aan te bevelen.

## 5. AirPEX voor ozon

### 5.1. Algemeen

Ter illustratie wordt in dit hoofdstuk het AirPEX toegepast voor de blootstelling van de Nederlandse bevolking aan ozon. Hierbij zijn voor alle component-specifieke onderdelen de functies en de bijbehorende indelingen beschreven. Vervolgens wordt ingegaan op de herkomst en de inhoud van de inputgegevens. Aansluitend wordt een voorbeeld gegeven van de berekende populatieblootstelling aan ozon voor 3 augustus 1990, een dag met matige tot ernstige smogvorming.

### 5.2. Inputgegevens

#### 5.2.1. Sociaal-demografische gegevens.

Voor de Nederlandse bevolking worden gegevens over leeftijd, geslacht, woonplaats en aantal werkenden maandelijks gepubliceerd door het Centraal Bureau van de Statistiek. Demografische gegevens worden jaarlijks gepubliceerd voor alle Nederlandse provincies. Met behulp van de postcode (PTT Post, 1979) worden de demografische gegevens per (Pluim)regio berekend. Hierbij wordt aangenomen dat de demografische gegevens die voor de totale Nederlandse bevolking gelden, ook geldig zijn per regio. Het inputbestand bevat informatie over de gegevens die in tabel 4 zijn weergegeven.

**Tabel 4: De indelingen van de gebruikte populatiekenmerken**

populatiekenmerk $X_n$	categorieën
$X_1$ (leeftijd)	0-4, 5-9, 10-19, 20-64, 65+
$X_2$ (geslacht)	man, vrouw
$X_3$ (werksituatie)	werkend, niet werkend
$X_4$ (regio)	14 Pluim-regio's (zie bijlage II)
$X_5$ (macro-omgeving)	grote stad $\geq 100.000$ inwoners, platteland (regio) $< 100.000$ inwoners.

#### 5.2.2. Regionale concentratiegegevens.

De luchtkwaliteit in Nederland wordt door het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit van het R.I.V.M. gemeten en geregistreerd; sinds 1975 zwaveldioxide en sinds 1978 stikstof-oxide, koolstofmonoxide en ozon. Het meetnet is zo opgezet dat de luchtkwaliteit van

regionale achtergrondgebieden, het achtergrondniveau van een aantal middelgrote en grote steden en het niveau direct naast een weg met veel verkeer (afstand kleiner dan 35 m) wordt verkregen (RIVM, 1989).

De luchtkwaliteits-inputgegevens (de regionale uurgemiddelde ozonconcentraties voor de 14 Pluim-regio's) worden berekend door de uurgemiddelde concentraties van een aantal representatieve meetstations te middelen. Voor de volledige beschrijving van deze procedure, inclusief de interpolatie van ontbrekende meetgegevens, wordt verwezen naar bijlage II.

### 5.2.3. De activiteitenpatronen van de Nederlandse bevolking.

Vanaf 1920 zijn er vele studies geweest, voornamelijk in de V.S., waarin onderzoek werd gedaan naar de tijdbesteding van een populatie. De doelstellingen van deze studies hadden allen een sociologisch karakter en weken sterk af van de doelstellingen van op blootstelling gericht tijdbestedingsonderzoek. De verzamelde gegevens zijn hierdoor grotendeels onbruikbaar voor blootstellingsonderzoek omdat cruciale gegevens ontbreken. In veel van deze onderzoeken is geen of slechts een beperkt aantal micro-omgevingen onderscheiden en meestal is niet het tijdstip waarop een activiteit plaatsvindt geregistreerd, maar bijvoorbeeld slechts de duur van een activiteit of het aantal malen dat de activiteit herhaald wordt. Vandaar ook de aanduiding *tijdbesteding*: de tijdsduur besteed aan een activiteit. De gemeten waarden worden bovendien vaak als gemiddelden gegeven, zonder standaardafwijking. Ook tijdbestedingsonderzoek dat in Nederland is uitgevoerd (Oudhof et al., 1987; CBS, 1987; Stoop, 1990) is minder goed bruikbaar voor blootstellingsonderzoek. In deze onderzoeken is niet geregistreerd of de personen binnen danwel buiten verbleven, met welke lichamelijke inspanning ze hun bezigheden verrichtten, en de activiteitenpatronen van kinderen jonger dan 12 jaar ontbreken.

Recent worden in de V.S. verschillende tijdbestedingsonderzoeken specifiek voor blootstellingsdoeleinden uitgevoerd. Het meest complete onderzoek is het door de California Air Resources Board uitgevoerde onderzoek naar de tijdbesteding van de inwoners van California (VS), voor inwoners van 12 jaar en ouder (Wiley et al., 1991a), en voor kinderen jonger dan 12 jaar (Wiley et al., 1991b). In beide onderzoeken werd via telefonische enquêtes gegevens over de activiteitenpatronen van de vorige dag verkregen. De Californische tijdbestedingsgegevens zijn echter niet direct te vertalen naar de Nederlandse situatie omdat het verschil in klimaat, leefstijl en activiteitenpatronen groot is.

In het kader van dit blootstellingsproject is in 1992 een oriënterend onderzoek naar de activiteitenpatronen van de bevolking uitgevoerd (Janssen et al., 1993), waarin een beperkte populatie van alle leeftijden schriftelijk is geënquêteerd. Ten bate van de modellering van blootstelling aan ozon is uit deze gegevens, en uit de door het CBS verzamelde gegevens (Oudhof et al., 1987; CBS, 1987; Stoop, 1990) een standaard

activiteitenpatroon voor de onderscheiden bevolkingsgroepen geconstrueerd (zie bijlage III). Dit activiteitenpatroon is een eerste benadering van de gemiddelde activiteiten van de (Nederlandse) bevolking. De blootstellingsschattingen die met behulp van dit patroon kunnen worden gemaakt, moeten derhalve met de grootste voorzichtigheid worden gebruikt.

### 5.3. Parameter-instellingen.

#### 5.3.1. De macro-omgeving-functie $f_a$ .

Ozon is een sterk reactieve stof die gevormd wordt onder invloed van zonlicht uit stikstofdioxide en vluchtige koolwaterstoffen. De grote reactiviteit van ozon veroorzaakt grote en snelle fluctuaties van ozonconcentraties op plaatsen waar (lokaal) veel stikstofdioxide geëmitteerd wordt, bijvoorbeeld in steden en op drukke wegen. Over het algemeen zijn de concentraties ozon in grote steden lager dan op het platteland (Meagher et al., 1987; RIVM, 1991). Een schatting van stedelijke concentraties kan worden gemaakt door gebruik te maken van een vaste afname per kilometer bebouwing (Nootbos et al., 1989). De concentraties in het benedenwindse deel van de stad kunnen echter enigszins verhoogd zijn bij lage windsnelheden (de Leeuw, 1989), echter in het benedenwindse achterland (tot 40 km) van een stad worden weer verlaagde concentraties aangetroffen (Leaney et al., 1990). Een gegeneraliseerd model waarin het verband met windsnelheid en ruimtelijke ordening verwerkt is, is momenteel niet beschikbaar, noch realiseerbaar.

Als eerste globale schatting worden twee macro-omgevingen onderscheiden naar urbanisatiegraad: grote stad (steden  $\geq 100.000$  inwoners) en platteland (steden  $< 100.000$  inwoners). De landelijk gemeten gemiddelde ozonconcentraties in deze twee macro-omgevingen zijn gebruikt voor de afleiding van de functies  $f_a$  (vergelijking 21): voor het jaar 1990 zijn de uurgemiddelde ozonconcentraties voor stedelijke en achtergrondstations met elkaar vergeleken (RIVM, 1991). Het jaargemiddelde, het 50-percentiel en het 98-percentiel van de (over 1-uur gemiddelde) ozonconcentraties in de steden bedroegen respectievelijk 77%, 71% en 84% van de overeenkomstige regionale concentraties. Hieruit is voor de functie  $f_a$  afgeleid voor de categorie a=stad:  $k_a=0,8$ ;  $l_a=1$ ;  $m_a=0$ . Voor de concentraties buiten deze steden (categorie platteland) wordt aangenomen dat zij gelijk zijn aan de gemeten achtergrondconcentraties.

#### 5.3.2. De micro-omgeving-functie $f_i$ .

Voor de stof ozon worden de micro-omgevingen binnen-thuis, binnen-elders, binnen-ingemotoriseerd-voertuig, buiten-op-drukke-sstraat, en buiten-elders onderscheiden. Door de grote reactiviteit van ozon neemt de concentratie in afgesloten ruimtes zeer snel af. De reactiesnelheid van de afbraak ligt in de grootte orde van  $0,03-0,0003 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{min}$  en wordt bepaald door het soort en het oppervlak van de binnenhuisbekleding, de



luchtvochtigheid en de temperatuur (Mueller et al., 1973; Sabersky et al., 1973). Omdat ozon geen binnenshuisbronnen van enige betekenis heeft, worden de concentraties binnen volledig bepaald door de hoeveelheid buitenlucht die actief of passief naar binnen wordt getransporteerd. De variabiliteit in ventilatie van woningen, kantoren en dergelijke, en de variabiliteit in menselijk (ventilatie-)gedrag is zeer groot. De gemeten I/O ratio's van gebouwen variëren van 0,05 (air conditioning met gefilterde lucht) tot 0,98 (grote natuurlijke ventilatie door openstaande deuren) (Weschler et al., 1989; Weschler et al., 1991; Yocom, 1982; USEPA, 1984; Thompson et al., 1973).

De micro-omgeving "binnen-in-gemotoriseerd-voertuig" wordt als een relevante micro-omgeving onderscheiden: door de aanwezigheid van hoge concentraties stikstofoxiden en de relatief kleine afgesloten ruimte zijn in gemotoriseerde voertuigen de ozonconcentraties zeer laag (Petersen et al., 1975; Paul et al., 1986).

De micro-omgeving "buiten-op-drukke-straat" wordt als aparte micro-omgeving onderscheiden eveneens vanwege hoge concentraties stikstofoxiden uit de uitlaatgassen.

Metingen van ozon in micro-omgevingen zijn in Nederland niet of nauwelijks uitgevoerd. Onderzoek in de V.S. is niet goed vertaalbaar naar de Nederlandse situatie door de verschillende klimatologische omstandigheden, en met name door het gebruik van air-conditioning in woonhuizen.

De variabelen van micro-omgeving functie  $f_j$  voor de onderscheiden micro-omgevingen (tabel 5), zijn gebaseerd op de gemiddelde waarden van de I/O-ratio's uit het Nationaal Exposure Model (Paul et al., 1986). Het ontbreken van ozon-emiterende bronnen van enig belang leidt tot de keuze van  $m_j=0$ .

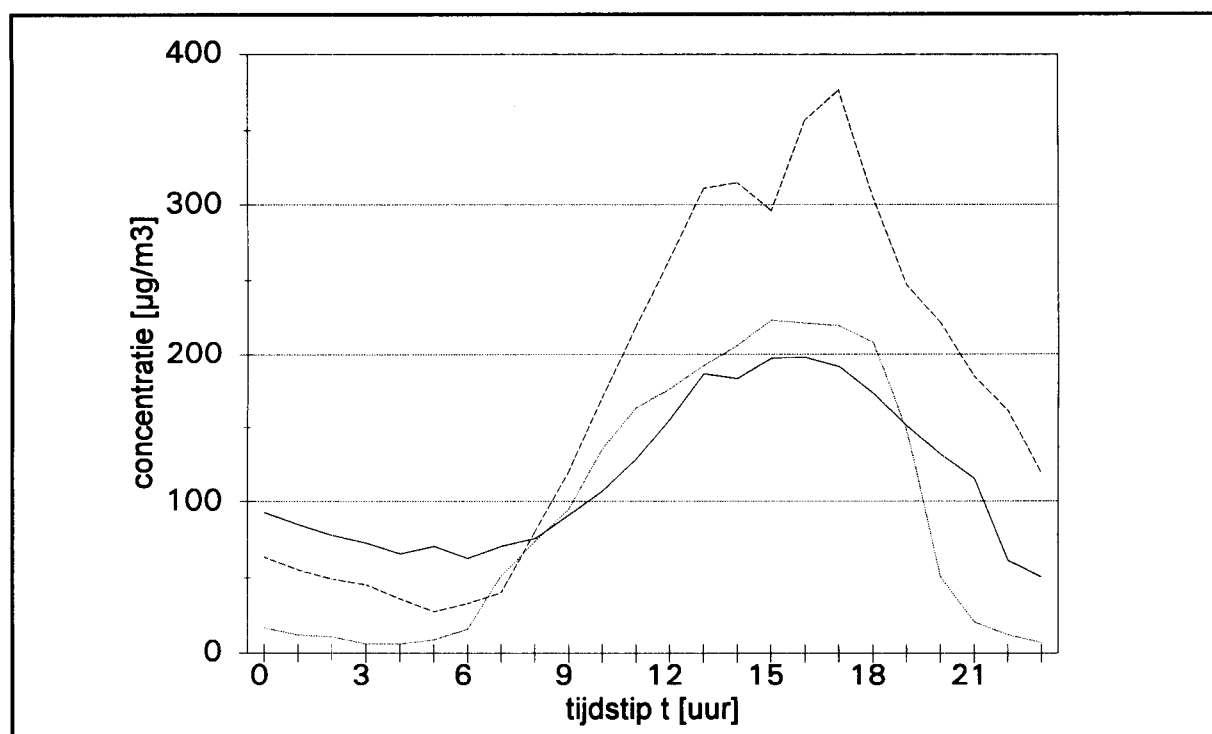
**Tabel 5: De instellingen van de micro-omgeving specifieke variabelen**

micro-omgeving j	$k_j$	$l_j$	$m_j$
binnen-thuis	0,58	1	0
binnen-elders	0,52	1	0
binnen-gemotor.-voertuig	0,11	1	0
buiten-op-drukke-weg	0,18	1	0
buiten-elders	1,0	1	0

#### 5.4. Output voorbeeld.

In dit output voorbeeld wordt voor één dag een schatting gegeven van een aantal blootstellingsparameters van de Nederlandse bevolking aan ozon, uitgaande van de in dit hoofdstuk beschreven instellingen en inputgegevens.

3 augustus 1990 was een dag met matige tot ernstige smogvorming; de gemeten maximale 1-uurs ozonconcentraties varieerden van  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Top Noord Holland) tot  $380 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Zeeland), over Nederland gemiddeld bedroeg de max. 1-uurs concentratie ozon  $258 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . In figuur 6 is voor een drietal regio's het verloop over de dag van de 1-uur gemiddelde concentraties weergegeven. Goed zichtbaar in dit figuur zijn de verschillen in concentratieprofielen die in Nederland op deze dag (dagnr 215) voorkwamen. In Noord Holland was het profiel relatief "vlak", de ozonconcentraties varieerden tussen ca. 75 en  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . In Zeeland kwamen op deze dag de grootste verschillen voor, de concentraties varieerden tussen de 40 en de  $380 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Het concentratieprofiel in Limburg lag daar gemiddeld tussen in met ozonconcentraties die tussen ca. 5 en  $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$  varieerden.

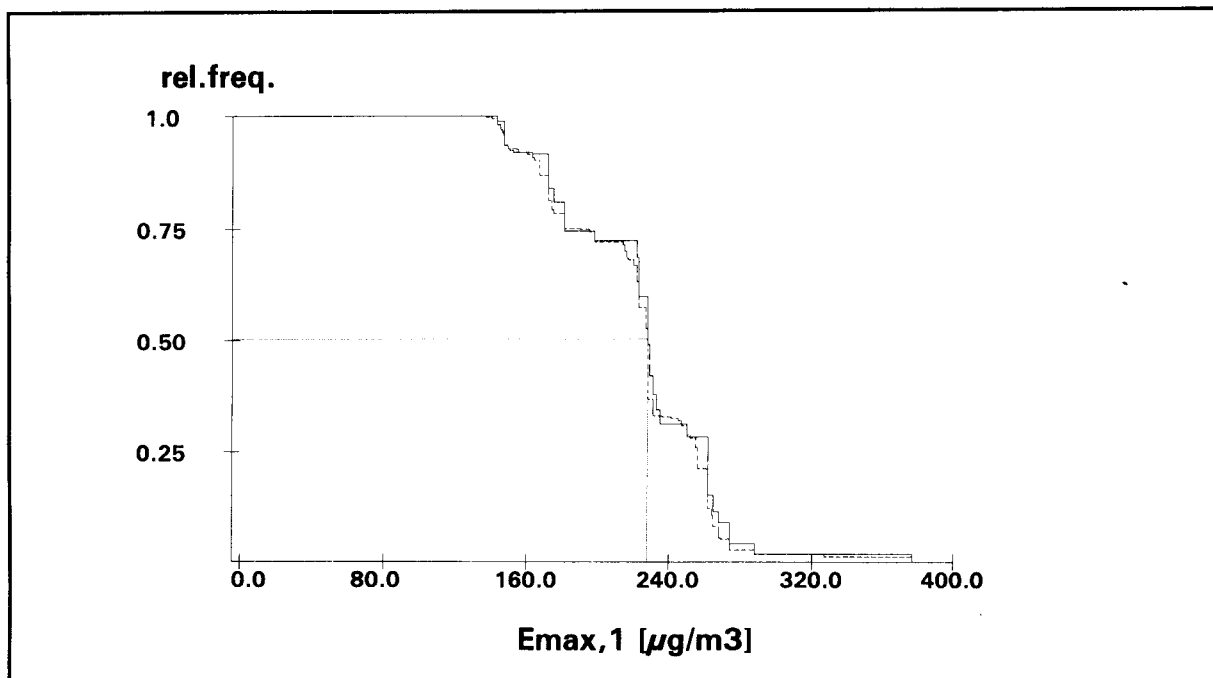


Figuur 6. Het verloop in de tijd van de ozon concentraties in drie regio's: (—) Top Noord Holland, (---) Zeeland, en (...) Limburg.

Met behulp van AirPEX versie 1.0 is voor de Nederlandse bevolking een schatting gemaakt van de blootstelling aan ozon. Hierbij zijn een vijftal outputparameters berekend: de maximale 1-uurs blootstelling ( $E_{\text{max},1}$ ), de lopende maximale 8-uurs gemiddelde blootstelling ( $E_{\text{max},8}$ ), de 24-uurs gemiddelde blootstelling ( $E_{\text{gem},24}$ ) en de maximale 1- en 8-uurs gemiddelde dosis ( $D_{\text{max},1}$  en  $D_{\text{max},8}$ ). Bij het berekenen van deze gegevens is steeds uitgegaan van twee verschillende populatiegroepen (leeftijd < 10 jaar,

en leeftijd  $\geq 10$  jaar) zodat een eerste indicatie verkregen wordt van de verschillen in blootstelling tussen populatiegroepen.

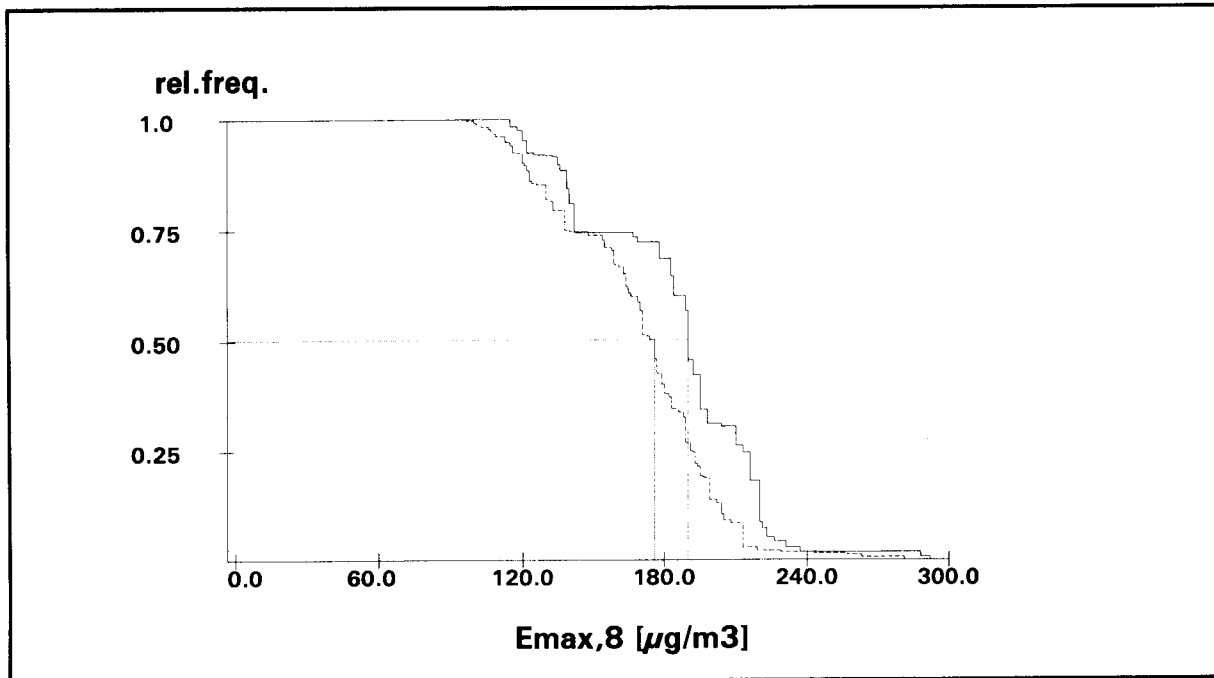
In figuur 7 is de verdeling van de maximale 1-uurs blootstelling op dag 215 over de bevolking weergegeven voor de groep van 10 jaar en ouder en de kinderen tot 10 jaar. In dit figuur is te zien dat het blootstellings-patroon van de bevolkingsverdeling over de gehele breedte bijna identiek is. De mediaan van de verdeling ligt voor beide groepen op ca.  $230 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ondanks het gegeven dat deze groepen een ander standaard activiteiten-patroon hebben en niet op dezelfde tijdstippen buitenshuis zijn, komen beide groepen in aanraking met de maximale concentraties van deze dag.



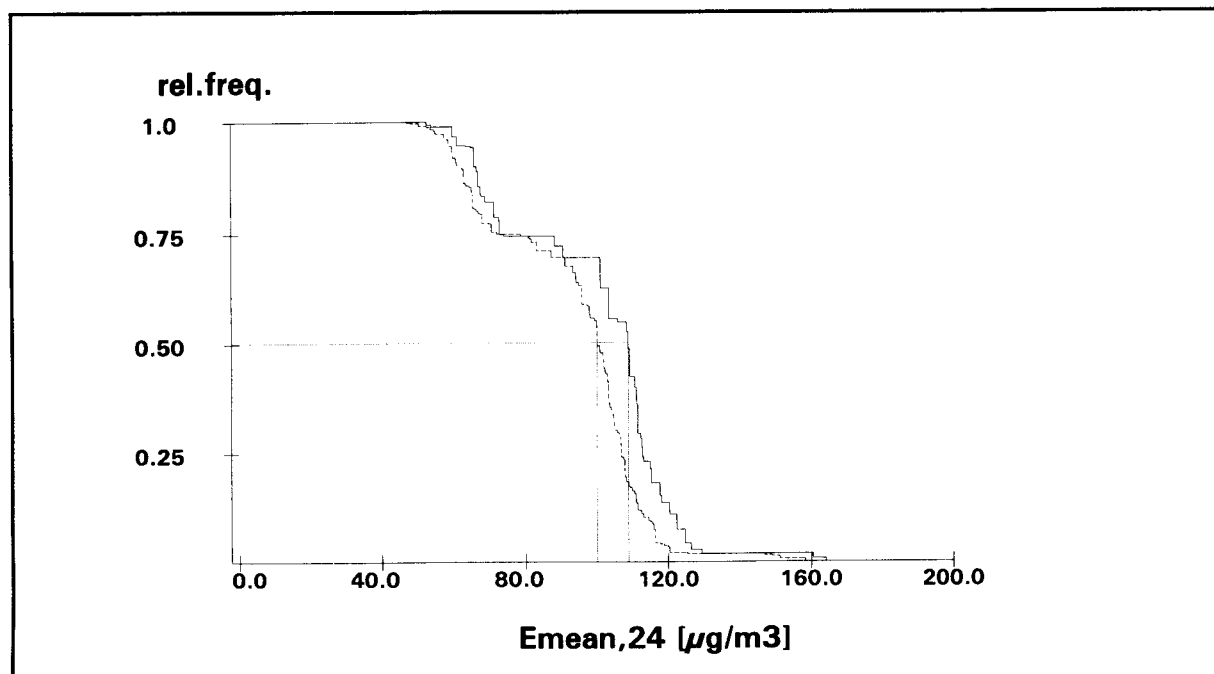
Figuur 7. De (cumulatieve) verdeling van de maximale 1-uur blootstelling  $E_{\max,1}$  aan ozon op dag 215: (---) kinderen tot 10 jaar, (—) groep vanaf 10 jaar.

In figuur 8 is de verdeling van de maximale 8-uurs blootstelling over de bevolking op dezelfde dag weergegeven, waarbij weer onderscheid is gemaakt tussen de groep van 10 jaar en ouder en kinderen jonger dan 10 jaar. In deze figuur is te zien dat de verdelingen van  $E_{\max,8}$  op elkaar lijken en dat de kinderen gemiddeld een ca.  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  hogere blootstelling hebben. De mediaan van  $E_{\max,8}$  ligt bij de kinderen op ca.  $175 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en bij de oudere groep op ca.  $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Het verschil in blootstelling komt waarschijnlijk voort uit de verschillen in activiteitenpatronen tussen volwassenen en kinderen. In de standaard activiteitenpatronen die als input gebruikt zijn, zijn kinderen onder de 10 jaar langer dan

de rest van de bevolking buiten aanwezig (gem. 3¼ uur i.p.v. gem. 2½ uur), en bovendien spelen ze buiten op tijdstippen waarop hoge ozon concentraties voorkomen ('s middags na schooltijd).



Figuur 8. De (cumulatieve) verdeling van de maximale 8-uurs blootstelling  $E_{max,8}$  aan ozon op dag 215: (---) kinderen tot 10 jaar, (—) groep vanaf 10 jaar.

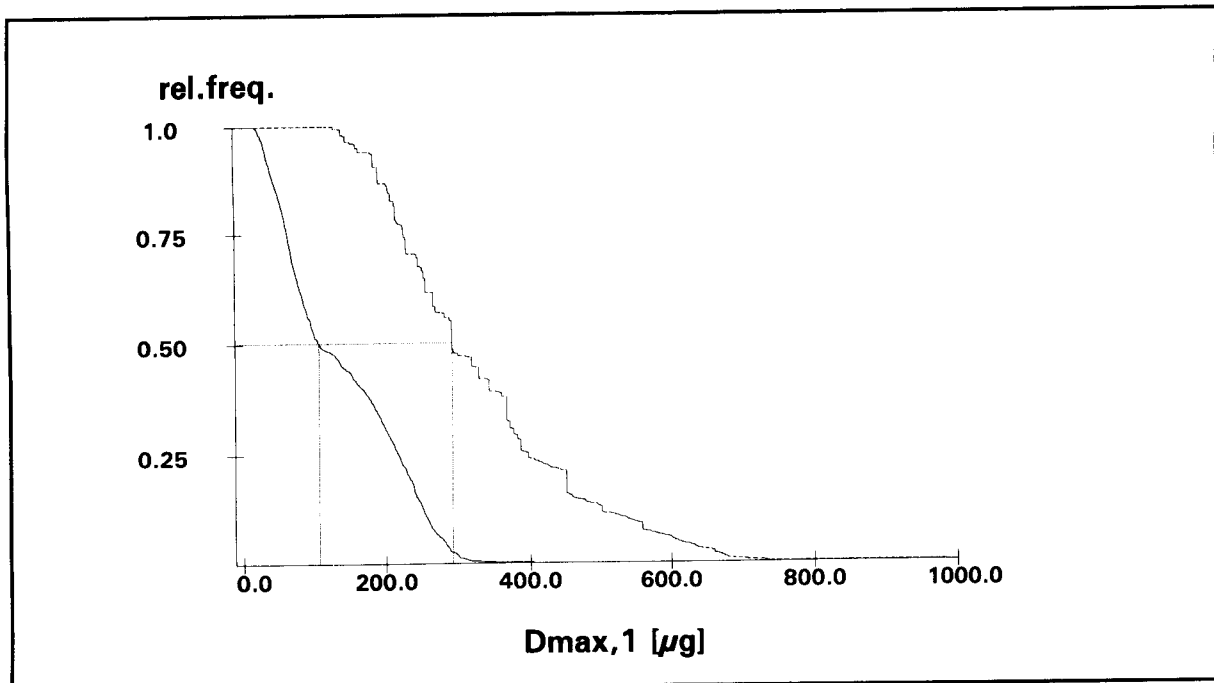


Figuur 9. De (cumulatieve) verdeling van de over 24-uur gemiddelde blootstelling  $E_{gem,24}$  aan ozon op dag 214: (---) kinderen tot 10 jaar, (—) groep vanaf 10 jaar.

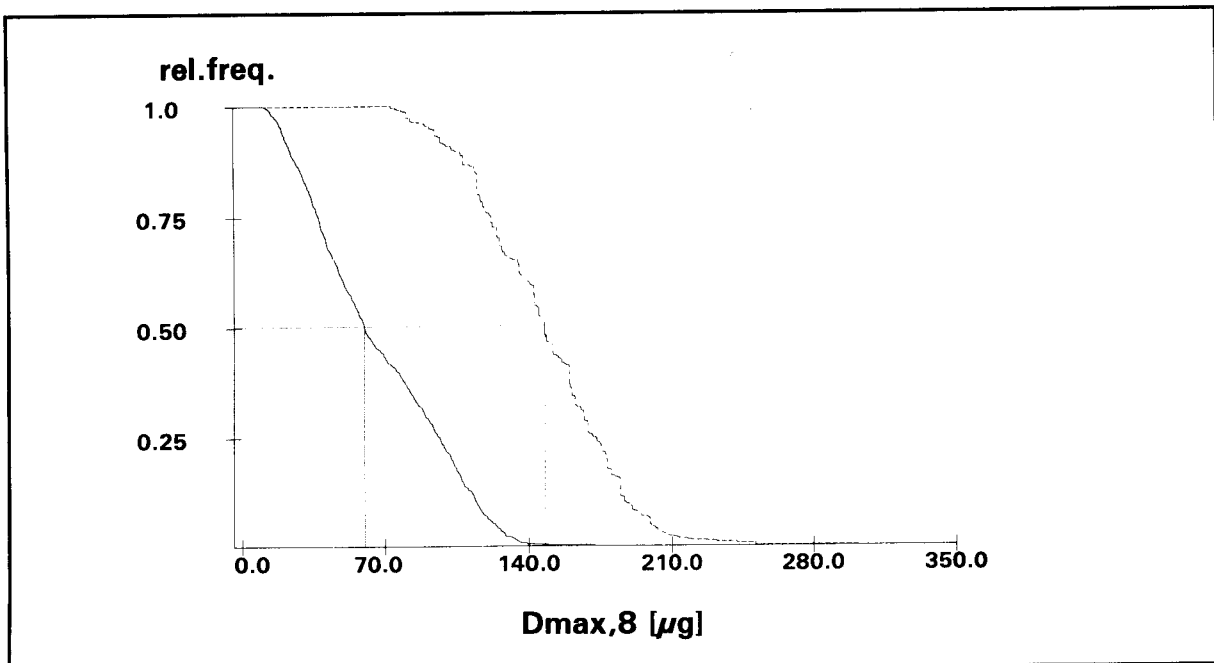
De verschillen tussen deze groepen blijven bestaan wanneer de integratietijd van de outputparameter verlengd wordt tot 24 uur. In figuur 9 is de gemiddelde blootstelling over 24 uur ( $E_{\text{gem},24}$ ) weergegeven voor de twee groepen. In deze figuur is zichtbaar dat de verdelingen van  $E_{\text{gem},24}$  sterk op elkaar lijken, en dat de kinderen een gemiddeld ca.  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  hogere blootstelling hebben. De mediaan van  $E_{\text{gem},24}$  ligt bij de kinderen op ca.  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en bij de oudere groep op ca.  $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . De verschillen in activiteitenpatronen tussen de twee groepen zijn blijkbaar dermate sterk dat zowel bij de  $E_{\text{max},8}$  als bij de  $E_{\text{gem},24}$  een procentueel even groot verschil tussen de blootstelling van kinderen onder 10 jaar en van de oudere groep ontstaat.

Wanneer naar de geïnhaleerde dosis wordt gekeken ontstaat een ander beeld. In figuur 10 en 11 zijn de maximale 1-uurs en de maximale 8-uurs gemiddelde dosis weergegeven voor beide groepen. Uit deze figuren blijkt dat aanzienlijke verschillen optreden tussen de verschillende bevolkingsgroepen. De mediaan van  $D_{\text{max},1}$  ligt voor de kinderen op ca.  $130 \mu\text{g}$  en voor de oudere groep op ca.  $325 \mu\text{g}$ . Bij de  $D_{\text{max},8}$  ligt de mediaan op  $60 \mu\text{g}$  respectievelijk op  $150 \mu\text{g}$  ozon. Deze verschillen tussen populatiegroepen kunnen afkomstig zijn uit de verschillende activiteitenpatronen, met name de inspanningsniveaus kunnen aanzienlijke verschillen in geïnhaleerde dosis opleveren. Verwacht zou worden dat kinderen een hogere dosis krijgen door de hoeveelheid tijd die met een matig of hoog inspanningsniveau wordt doorgebracht. De gegeven figuren kunnen echter niet direct geïnterpreteerd worden omdat de absolute dosis als outputparameters weergegeven is. Door de veel lagere ademvolumina (voortkomend uit het lagere lichaamsgewicht) is de absolute dosis van de groep kinderen tot 10 jaar aanzienlijk lager dan van de groep van 10 jaar en ouder. De verschillende vorm van de verdelingen lijkt echter aan te geven dat van de populatie kinderen een groter deel in de "upper tail" van de verdeling zit; in vergelijking met de oudere groep heeft een groter deel van deze populatie een relatief hoge dosis geïnhaleerd.

Uit deze eerste zeer beperkte exercitie blijkt dat activiteitenpatronen de verschillende blootstellingsparameters (inclusief dosisparameters) verschillend beïnvloeden. De twee gebruikte populatiegroepen zijn verondersteld gelijk over het Nederlands grondgebied te zijn verdeeld en hebben daarmee gelijke potentiële blootstelling. De 10 gebruikte standaard activiteitenpatronen zijn een zeer beperkte en gemiddelde weergave van de activiteitenpatronen. De hier gepresenteerde blootstellingsverdelingen zijn dan ook weergaves voor "gemiddelde" populatiegroepen. De relatief kleine verschillen in activiteitenpatronen leiden echter bij de verschillende blootstellingsparameters tot heel verschillende uitkomsten.



Figuur 10. De (cumulatieve) verdeling van de geïnhalerde maximale 1-uurs dosis  $D_{max,1}$  over de bevolking op dag 215: (---) kinderen tot 10 jaar, (—) groep vanaf 10 jaar.



Figuur 11. De (cumulatieve) verdeling van de maximale 8- uurs gemiddelde dosis  $D_{max,8}$  over de bevolking op dag 215: (---) kinderen < 10 jaar, (—) groep vanaf 10 jaar.

## 6. Conclusies en discussie

AirPEX is ontworpen als instrument ten behoeve van de kwantitatieve schatting en evaluatie van gezondheidsrisico's van blootstelling aan luchtverontreinigende stoffen. Ontworpen voor deze specifieke doelstelling onderscheid AirPEX zich op verschillende punten van de reeds bestaande modellen, o.a. door de onafhankelijkheid van luchtverontreinigende component en geografisch gebied, en door de brede range aan mogelijke outputparameters. Deze zeer verschillende outputparameters op het gebied van luchtkwaliteit, (potentiële) blootstelling, (effectieve) dosis, respons en individuele persoonskarakteristieken zijn noodzakelijk voor het beantwoorden van de vele vragen die vanuit risicoschattingsoogpunt gesteld worden. De basis van AirPEX is het algemeen toepasbare blootstellingsmodel. Bij de toepassing van het model voor een specifieke luchtverontreinigende stof (of geografisch gebied) zijn stofspecifieke gegevens noodzakelijk. Hierdoor is het noodzakelijk voor elke stof een inventarisatie uit te voeren naar noodzakelijke en beschikbare inputgegevens. In dit rapport is hiervan een uitwerking voor de stof ozon en het Nederlands gebied gegeven in hoofdstuk 5.

Bij het ontwerp van het model is ervoor gekozen om het gebruik van de inputgegevens over activiteitenpatronen door middel van een tweetal methodes uit te voeren, namelijk m.b.v. een beperkte set van "standaard" activiteitenpatronen (gemiddeld patroon voor elke bevolkingsgroep), of m.b.v. een grote verzameling individuele activiteitenpatronen van een representatieve populatie (werkelijk gemeten voor elk individu). De standaard activiteitenpatronen zijn bedoeld om een eerste indicatie te geven van mogelijke blootstellingsschattingen, en dienen beschouwd te worden als voorlopige werkbestanden bij de ontwikkeling van het model.

Bij het ontwerp is uitgegaan van een individuele aanpak, voor elk individu van een populatie wordt de blootstelling berekend. De individuele gegevens blijven bewaard, zodat na een simulatie een individu met bijvoorbeeld zeer hoge blootstelling te identificeren is naar deze gegevens (bv. leeftijd, werksituatie of individueel activiteitenpatroon). Deze gegevens kunnen zeer relevant zijn voor identificatie van zogenoemde "risico-groepen". Het model is zodanig opgebouwd dat voor de meeste inputvariabelen zowel puntschattingen als verdelingsfuncties kunnen worden gebruikt. Met deze verdelingsfuncties kan inzichtelijk worden gemaakt hoe de variabiliteit en/of onzekerheid in inputvariabelen doorwerkt in de outputparameters. Deze optie is o.a. relevant voor het optimaliseren van onderzoeksopzetten.

Voor het berekenen van de geïnhalede dosis worden in AirPEX een aantal aannames gedaan over de ademvolumes bij verschillende inspanningsniveaus, waarbij verondersteld wordt dat alleen het lichaamsgewicht een invloed uitoefent. Het ademvolume (bij een zeker inspanningsniveau) is echter ook afhankelijk van leeftijd, geslacht en conditie, waarbij onderlinge afhankelijkheden optreden met lichaamsgewicht. Bovendien bestaat een

grote variabiliteit in ademvolumes tussen individuen uit één bevolkingsgroep, en tussen de inspanningsniveaus van één individu. Zeer grote individuele variantie in ademvolumes is gemeten (US-EPA, 1989). Op een drietal niveaus is het mogelijk onderscheid te maken in ademvolumes binnen een populatie (tussen groepen, tussen de individuen van een groep, en tussen de inspanningsniveaus van een individu). AirPEX 1.0 maakt alleen een beperkt onderscheid tussen bevolkingsgroepen op basis van lichaamsgewicht.

Er kan geconcludeerd worden dat het model aan de meeste gestelde eisen voldoet. Aan een tweetal eisen kan AirPEX momenteel niet voldoen: de identificatie van individuen en het flexibel gebruiken van inputgegevens (m.n. de werkelijk gemeten activiteitenpatronen).

Het identificeren van individuen in de blootstellingsverdeling, de zogenaamde "back-track"-functie, is nog niet geïmplementeerd. De opbouw van het programma is echter zodanig dat de gegevens op individueel niveau bewaard blijven, zodat het mogelijk is individuen terug te traceren na het berekenen van een outputparameter op bevolkingsniveau. De functie die individuele activiteitenpatronen gebruikt als input (als alternatief voor de standaard activiteitenpatronen) moet nog ontwikkeld worden.

Voor een effectieve toepassing van AirPEX in het risico-schattingsgebied zijn deze twee functies onontbeerlijk.

Momenteel bevindt de ontwikkeling van AirPEX 1.0 zich in de afrondingsfase (implementatie, zie 1.3). De nog uit te voeren werkzaamheden betreffen de implementatie van de twee hierboven aangegeven functies, de modelanalyse (inclusief gevoeligheids/onzekerheidsanalyse) en validatie voor zover daartoe mogelijkheden zijn.

Het toepassen van gevoeligheids- en onzekerheidsanalyses op de inputgegevens over activiteitenpatronen zal afwijken van de gebruikelijke methodiek waarbij inputvariabelen systematisch worden gevarieerd. Activiteitenpatronen zijn uiterst complexe gegevens, met een grote variatie in verblijfplaats (micro-omgeving), duur van het verblijf, tijdstip en inspanningsniveau. Bovendien zijn deze gegevens onderling sterk gecorreleerd. De gevoeligheid van het model voor activiteitenpatronen kan slechts op relatieve wijze worden getest door het gebruik van meerdere tevoren vastgelegde standaard activiteitenpatronen.

Het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse en de daaruit volgende rangorde in variabelen op basis van hun bijdrage aan de outputvariantie, zal aangeven welk onderzoek (ter karakterisering van deze parameters) het meest effectief is. Uit de eerste experimentele exercities blijken de activiteitenpatronen bijzonder bepalend te zijn voor zowel de blootstelling als de dosis van een populatie. Mede vanwege de grote lacune in de kennis op dit gebied, is in 1994 en 1995 een onderzoek naar de activiteitenpatronen van de Nederlandse bevolking uitgevoerd. De resultaten van dit onderzoek zullen in de toekomst als inputgegevens in het model geïncorporeerd worden.



Op basis van de eerste exercities voor deeltjesvormige luchtverontreiniging (RIVM, 1995a) en ozon (RIVM, 1995b) kan worden geconcludeerd dat AirPEX een compleet en flexibel rekensysteem is, dat goed bruikbaar is bij de beantwoording van vragen over kwantitatieve gezondheidsrisico's van luchtverontreinigingen.



## Referenties

- Baars, H.P., C. Huygen, H.C. Eerens, C.J. Sliggers. Handleiding CAR programma. TNO/ RIVM Rapportnr. 228475007, RIVM, Bilthoven.
- CBS (1987). De tijdbesteding van de Nederlandse bevolking, kerncijfers 1987, Centraal Bureau voor de Statistiek, Voorburg.
- Duan, N. (1982). Models for human exposure to air pollution. *Environ. Int.* 8, p. 305-309.
- Duan, N. (1991). Stochastic microenvironmental model for air pollution exposure. *J. Exposure Anal. Environ. Epidemiol.* 1, p. 235-257.
- Egmond, N.D. van, D. Onderdelinden (1981). Objective analysis of air pollution monitoring network data; spatial interpolation and network density. *Atmos. Environ.* 15-6, p. 1035-1046.
- Janssen, P.H.M. , W. Slob, J. Rotmans (1990) Gevoeligheidsanalyse en Onzekerheidsanalyse: een Inventarisatie van Ideeën, Methoden en Technieken, Rapportnr. 958805001, RIVM, Bilthoven.
- Janssen, N.A.H., B. Brunekreef, J.P.Zock, P. Fischer, J. van Scheindelen (1993). Activiteitspatronen in verband met populatie-expositie aan luchtverontreiniging. Rapportnr. 1993-466, Landbouwwuniversiteit Wageningen.
- Johnson, T. (1981). The NAAQS Exposure Model (NEM) and its application to particulate Matter, Draft report prepared by PEDCo Environmental, Inc. for the Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, USA.
- Johnnson, T.R., R.A. Paul, J.E. Capel, T. McCurdy (1990). Estimation of ozone exposure in Houston using a probabilistic version of NEM. Presentation at the 83th Ann. Meeting & Exhibition of the Air & Waste Management Assoc. 1990 in Pittsburgh, PA, USA.
- Kleinman, M.T. (1984). Sulfur dioxide and exercise: relationships between response and absorption in upper airways. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 34, p. 32-37.

Kleinman, M.T. (1991). Effects on pulmonary function: the relationship of response to dose. *J. Exposure Anal. Environ. Epidemiol.*, 1, p. 309-325.

Leeuw, F.A.A.M. de (1989). STAD: A Simple Town Air Dispersion model for simulation of photochemical air-pollution in urban areas. Rapportnr. 228603007, RIVM, Bilthoven.

Leaney, D.M., M.C. Hansen (1990). Observational evidence of ozone depletion by nitric oxide at 40 km downwind of a medium size city. *Atmos. Environ.* 24A, pp. 2533-2540.

Lioy, P.J. (1990). Assessing total human exposure to contaminants, a multidisciplinary approach. *Environ. Sci. Technol.*, 24, p. 938-945.

Meagher, J.F., N.T. Lee, R.J. Valente, W.J. Parkhurst (1987). Rural ozone in the south-eastern united states. *Atmos. Environ.*, 21, p. 605-615.

Mueller, F.X., L. Loeb, W.H. Mapes (1973). Decomposition rates of ozone in living areas. *Environ. Sci. & Technol.* 7, p. 342-346.

Nagda, N.L., M.D. Koontz, E. Mulberg (1991). Development of a new indoor exposure assessment model. Presentation on the 84th Ann. Meeting & Exhibition of the Air & Waste Management Assoc. 1991 in Vancouver, British Columbia, USA.

Nootebos M.A., H.C. Eerens (1989). Programma's ozonblootstelling. Intern rapport RIVM, Bilthoven.

Ott, W.R. (1984). Exposure estimates based on computer generated activity patterns. *J. Toxicol. -Clin. Toxicol.*, 21, p. 97-128.

Ott, W.R. (1985). Total human exposure. *Environ. Sci. Technol.* 19, p. 880-886.

Ott, W., Thomas, J., Mage, D. (1988). Validation of the Simulation of Human Activity and Pollutant Exposure (SHAPE) Model using paired days from the Denver, CO, Carbon-monoxide field study. *Atmos. Environ.* 22, p. 2101-2113.

Oudhof, J., I.A.L. Stoop (1987). Tijdbestedingsonderzoek 1987, voorlopige uitkomsten eerste halfjaar 1987. Sociaal-Culturele berichten 88-8, Centaal Bureau voor de Statistiek, Voorburg.

Paul, R.A., Johnson, T., Pope, A., Ferdo, A. (1986). The NAAQS Exposure Mode (NEM) applied to ozone. Draftreport, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, USA.

Petersen, G.A., R.H. Sabersky (1975). Measurements of pollutants inside an automobile. J. Air Pollut. Control Assoc. 25, p. 1028.

Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery (1987). Numerical Recipes in C, the art of scientific computing. Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain.

Programmacommissie Mens en Lucht (1994). Werkprogramma MENS en LUCHT 1995-1998, Hoofdlijnen voor onderzoek aangaande gezondheidseffecten van Luchtverontreiniging.

PTT Post (1979). Woonplaatsenlijst, Staatsbedrijf der Posterijen, Telegrafie en Telefonie, Directie Postverkeer, afdeling Binnenland, 's Gravenhage, Nederland.

RIVM (1989). National Air Quality Monitoring Network, Technical description, Rapportnr. 228702017, RIVM, Bilthoven.

RIVM (1991). Luchtkwaliteit Jaaroverzicht 1990. Rapportnr. 222101015, RIVM, Bilthoven.

RIVM (1995a). Kwantitatieve schatting van het gezondheidseffect voor de Nederlandse bevolking door blootstelling aan PM<sub>10</sub> ("fijn stof") Rapportnr. 623710002, RIVM, Bilthoven.

RIVM (1995b). A quantitative assessment of the health effects of exposure to ozone of the Dutch population. Rapportnr. 623710004, RIVM, Bilthoven.

Sabersky, R.H., D.A. Sinema, F.H. Shair (1973). Concentrations, decay rates, and removal of ozone and their relation to establishing clean indoor air. Environ. Sci. & Techn. 7, p. 347-353.

Stoop I.A.L. (1990). Alles heeft zijn uur; tijdsbesteding per dag van de week en uur van de dag. Sociaal-culturele berichten 1990 - 13, Centraal Bureau voor de Statistiek, Voorburg.

Thompson, C.R., E.G. Hensel, G. Kats (1973). Outdoor-indoor levels of six air pollutants. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 23, p. 881-886.

US-EPA (1984). Air Quality Criteria for ozone and other photochemical oxidants. Reportnr. EPA-600/8-84/020aF, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., USA.

US-EPA (1989). Exposure factors handbook. Reportnr. EPA/600/9-89/043, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., USA.

US-EPA (1992). Guidelines for Exposure Assessment; Notice. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., Federal Register 57, No. 104, p. 22888-22938.

Weschler, C.J., H.C. Shields, D.V. Naik (1989). Indoor ozone exposures. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 39, p. 1562-1568.

Weschler, C.J., H.C. Shields, D.V. Naik (1991). Indoor-outdoor ozone measurements: 1988-1991. Presentation at the 84th Ann. Meeting & Exhibition of the Air & Waste Management Assoc. 1991, in Vancouver, British Columbia, USA.

Wiley, J.A., J.P. Robinson, T. Piazza, K. Garrett, K. Cirksena, Y. Cheng, G. Martin (1991a). Activity patterns of California residents, Final Report to California Air Resources Board, Survey Research Center, University of California, Berkeley, CA, USA.

Wiley, J.A., J.P. Robinson, Y. Cheng, T. Piazza, L. Stork, K. Pladsen (1991b). Study of children's activity patterns, Report to California Air Resources Board, Survey Research Center, University of California, Berkeley, CA, USA.

Winer, A.M., Lurmann, F.W., Coyner, L.A., Colome, S.D., Poe, M.P. (1989). Characterisation of air pollutant exposures in the California South Coast Air Basin: Application of a new Regional Human Exposure (REHEX) Model. Final Report, Statewide Air Pollution Research Center, University of California, Riverside, CA, USA.

Yocom, J.E. (1982). Indoor-outdoor air quality relationships: a critical review. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 20, p. 500-520.

## Bijlage I.

De bestaande blootstellingsmodellen.

### 1. NEM

Het NAAQS Exposure Model (NEM) 1981

Auteurs: Ted Johnson, Roy Paul

NEM applied to ozone 1986

Auteurs: Roy A. Paul, Ted Johnson, Anne Pope, Alicia Ferdo.

#### Modelbeschrijving:

Het NEM berekent de blootstelling van een populatie op basis van per cohort vastgelegde 'standaard' activiteitenpatronen. De concentraties in de verschillende micro-omgevingen worden met vaste factoren uit de buitenluchtconcentraties berekend. NEM-O3 is de versie die specifiek voor ozonblootstelling is ontwikkeld.

#### Aannames:

- Een gebied kan worden ingedeeld in zones met gelijke luchtkwaliteit afhankelijk van de soort stof. Voor NEM-O3 wordt het studiegebied ingedeeld in grote afgebakende "exposure districts".
- De relevante micro-omgevingen voor ozon zijn:
  1. binnen thuis, 2. binnen elders, 3. in motorvoertuig, 4. buiten nabij weg, 5. buiten rest.
- De inwoners van elk gebied worden ingedeeld in activiteitengroepen die verschillen in socio-demografische karakteristieken zoals leeftijd, werkstatus en reistijd. Voor NEM-O3 resulteert deze indeling in 53 activiteitengroepen.
- Voor elke groep wordt een standaard dagelijks activiteitenpatroon vastgesteld op grond van literatuurgegevens. Voor NEM-O3 bestaat dit uit een activiteit/ micro-omgeving/ inspanningsniveau per 10 minuten voor een hele dag, waarbij een verschillend activiteitenpatroon wordt gemaakt voor een weekdag, een zaterdag en een zondag, een koude en een warme dag.
- Binnen een activiteitenpatroon worden 3 inspanningsniveaus onderscheiden, laag, medium en hoog, en voor elke activiteit een vast inspanningsniveau.
- Bewegingen van de populatie kunnen plaatsvinden binnen een district of tussen twee districten die dan genoemd worden: het thuis-district en het werk-district. Voor het berekenen van het aantal werkenden met een ander werk- en thuisdistrict worden stadspecifieke forenzengegevens gebruikt.
- Alle personen uit een activiteitengroep die in het zelfde district wonen en werken worden een cohort genoemd, alle personen van een cohort krijgen dezelfde blootstelling.
- Uit de blootstellingen van de cohorten wordt op basis van de werkelijke grootte van de cohorten de populatieblootstelling berekend.

-O<sub>3</sub>-concentraties worden geschat voor de verschillende micro-omgevingen met behulp van geschatte I/O ratio's (vermenigvuldigingsfactoren genoemd) en gemeten buitenlucht concentraties.

Voor de I/O ratio's worden steeds drie schattingen gegeven die gebaseerd zijn op cumulatieve frequentie verdelingen van gemeten literatuurdata: lage schatting (25 percentiel waarde), beste schatting (50 percentiel), hoge schatting (75 percentiel).

Output:

De gepresenteerde resultaten geven in tabelvorm drie maten van blootstelling:

1. Het aantal keer dat een specifiek 1-uurs blootstellingsniveau wordt bereikt door de individuen uit een populatie gedurende een seizoen ("occurrences").
2. Het aantal mensen met een specifiek 1-uurs blootstellingsniveau over een jaar.
3. Het aantal mensen dat een maximaal niveau bereikt binnen een zeker concentratie-interval.

Elke schatting wordt weergegeven als lage, beste en hoge schatting.

## 2. PNEM

Probabilistic version of NEM, 1990

Auteurs: Ted R. Johnson, Roy A. Paul, James E. Capel, Thomas McCurdy

Modelbeschrijving:

PNEM is een verbeterde versie van NEM. In PNEM zijn probabilistische elementen ingebouwd in de algoritmen voor activiteitenpatronen, ventilatiegedrag, ozonconcentraties in de verschillende micro-omgevingen en ademvolumes.

Aannames:

De basisaannames voor PNEM zijn gelijk aan die van NEM, met een paar modificaties.

-In de definitie van de cohorten wordt nu ook het airconditioning systeem van het woonhuis meegenomen.

-Voor het te simuleren jaar worden meteorologische gegevens gebruikt om tot een schatting van het ventilatiegedrag van de bewoners te komen.

-Ademhalingssnelheid wordt ingedeeld als volgt: laag-slapend, laag-wakker, matig en snel.

-De waarden voor de ozonconcentraties en de ademminuutvolumes waarmee het model rekt worden getrokken uit verdelingen.

-De gebruikte ventilatiesnelheid is gerelateerd aan het lichaamsoppervlak

Output:

Behalve voor de blootstelling wordt nu ook een schatting gegeven voor het produkt van



de relatieve ademhalingsnelheid (ademhalingsnelheid per lichaamsoppervlak) en ozonconcentratie, een relatieve maat voor de geïnhaleerde dosis.

### 3. REHEX

Regional Human Exposure Model (REHEX) 1989

Auteurs: Arthur M. Winer, Frederick W. Lurmann, Lori A. Coyner, Steve D.

Colome, Minn P. Poe.

#### Modelbeschrijving:

Het REHEX model is speciaal ontworpen voor de beschrijving van de blootstelling en dosis van de populatie van California's South Coast Air Basin aan luchtverontreinigende stoffen (O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, PM-10). Het basisprincipe lijkt sterk op NEM. REHEX gebruikt een statistische benadering om de variabiliteit in de activiteitenpatronen van negen demografische groepen te beschrijven.

#### Aannamen:

- Het aantal standaard activiteitenpatronen per demografische groep wordt uitgebreid naar duizend in plaats van zes (NEM), deze geven activiteiten per kwartier.
- Deze duizend patronen per groep worden gemaakt door een submodel dat gebruik maakt van statistische informatie over de tijdbestedingen van de groep.
- Op grond van te voren berekende frequentie van het voorkomen van een activiteitenpatroon worden de individuen uit een activiteitengroep verdeeld over de bij de groep behorende activiteitenpatronen.
- Tussen mannen en vrouwen wordt geen onderscheid gemaakt.
- Het aantal demografische/activiteitengroepen is verminderd tot 9 in plaats van de 53 die het NEM beschrijft.
- Het lichamelijke inspanningsniveau heeft vijf mogelijke waarden: slaap, rust, laag, medium, hoog. De fractie van de populatie verkerende in elk inspanningsniveau is gespecificeerd voor elke demografische groep in elke micro-omgeving voor elk uur van de dag.
- De berekende dosis is een relatieve dosis, deze wordt berekend door de concentratie te vermenigvuldigen met een dosisfactor.
- De dosisfactor is specifiek voor het gegeven inspanningsniveau voor een gegeven demografische groep aan de hand van het fysisch-chemisch model van Kleinman (1984).
- De buitenluchtconcentraties ozon worden beschreven door verdelingen die gegenereerd worden op grond van waargenomen waarden, de weekdays worden onderscheiden van de weekenddagen.
- De concentraties in de drie gedefinieerde micro-omgevingen (binnen, in-transit, buiten) worden berekend uit de buitenluchtconcentratie en de I/O ratio's.

#### Output:

REHEX genereert cumulatieve frequentieverdelingen van blootstellingen en doses voor de bewoners van een stedelijke regio. De gepresenteerde blootstellingsgrootheden met een duur variërend van 15 minuten tot 1 jaar zijn:

- het aantal voorkomens (occurrences) van blootstelling en dosis aan specifieke ranges van concentraties en doseringen.
- het aantal personen met een of meer uren blootstelling en dosis aan specifieke ranges van concentraties en doseringen.

#### 4. SHAPE

Simulation of Human Air Pollution Exposure (SHAPE) 1983

Auteur: Wayne R. Ott, 1983-84

#### Validation for CO

Auteurs: Wayne Ott, Jacob Thomas, David Mage, Lance Wallace, 1988

#### Modelbeschrijving:

SHAPE is ontwikkeld om de populatie-blootstelling aan CO te simuleren. Het model simuleert zowel het activiteitenpatroon (de aanwezigheid in de verschillende micro-omgevingen) als de concentraties in de verschillende micro-omgevingen. Het activiteitenpatroon van een individu wordt volledig op stochastische basis gesimuleerd. De gebruiker kan een gedeelte aansturen door zelf de waarschijnlijkheidsverdelingen te specificeren waaruit de concentratie in een bepaalde micro-omgeving en de tijd die persoon i doorbrengt in micro-omgeving j kan worden getrokken.

#### Aannames:

- De activiteitenpatronen worden gesimuleerd uitgaande van de volgende regels:
  - .de selectie van een activiteit is gebaseerd op een waarschijnlijkheidsverdeling
  - .de tijdsduur van een activiteit is een randomvariabele, afhankelijk van het soort activiteit
  - .een activiteit die geselecteerd is blijft effectief tot het einde van zijn tijdsduur
  - .selectie van activiteiten kan afhankelijk zijn van de uitkomst van voorgaande activiteiten en van het tijdstip van de dag
- Een gegenereerd activiteitenpatroon geeft de micro-omgevingen voor een dag per minuut.
- Het aantal micro-omgevingen die relevant zijn voor CO zijn is in de eerste publikatie 14, in de tweede publikatie 22 stuks.
- De micro-omgevingen worden zo gedefinieerd dat de term micro-omgeving en activiteit synoniem zijn.

- De binnenshuis-concentratie is de som van een achtergrond-component en een micro-omgeving-component.
- De achtergrond-component wordt bepaald door gemeten buitenluchtconcentraties.
- De micro-omgeving-component wordt random getrokken uit log-normale verdelingen van gemeten micro-omgevingsconcentraties.

**Output:**

SHAPE genereert cumulatieve frequentieverdelingen van blootstelling van een werkende populatie voor een dag. De gepresenteerde blootstelingsgrootheden zijn:

- het percentage van de bevolkingsgroep met een bepaalde gemiddelde, maximale, of verschuivend gemiddelde blootstelling.

## Bijlage II

De Regionale gegevens.

De gebruikte gebiedsindeling in AirPEX is de indeling via Pluim-regio's (Eerens, 1990), zie onderstaande figuur.

- 1100 Kust Friesl.-Groningen
- 1110 Top Noord Holland
- 1200 Noord Holland
- 1210 Zuid Holland
- 1220 Zeeland-zuid
- 1300 Drenthe en omstreken
- 1400 Zeeland
- 1410 Rijnmondgebied
- 1500 Twente
- 1510 Gelderland
- 1520 Brabant
- 1600 Achterhoek
- 1610 Brabant-oost
- 1620 Limburg



## Bewerkingen regionale ozonconcentraties.

Aan elke regio zijn een of meer stations van het LML meetnet toegekend, zie onderstaande tabel.

Per uur worden de uurgemiddelde concentraties per station gemiddeld voor de regio. Bij uitval van een meetstation (niet bij uitval van gegevens over een regio), worden waarden voor dit station uit de concentratiewaardes van omliggende stations geïnterpo- leerd volgens van Egmond (1981). Stations binnen een straal van 75 km, met uitzonder- ing van de stations gelegen in steden, worden meegenomen in de berekening.

**Tabel : De meetnetstations per regio**

regiocode	omschrijving	LML-station
1100	Kust Friesland-Groningen	913, 918, 934
1110	Top Noord Holland	538
1200	Noord Holland	507, 540
1210	Zuid Holland	435, 443, 620, 633
1220	Zeeland-zuid	235
1300	Drenthe en omstreken	631, 818, 928
1400	Zeeland	301, 318
1410	Rijnmondgebied	435, 443, 437
1500	Twente	807
1510	Gelderland	724
1520	Brabant	209, 230, 724
1600	Achterhoek	722, 733, 807
1610	Brabant-oost	227, 131
1620	Limburg	107, 133

## Bijlage III.

### Standaard activiteitenpatronen.

In het dit voorbeeld worden de standaard activiteitenpatronen van de verschillende bevolkingsgroepen gegeven die gebruikt zijn bij de ontwikkeling van het model. Deze activiteitenpatronen zijn afgeleid uit gegevens verzameld in een oriënterend onderzoek in Ede (Janssen et al. 1993) op een zomerse doordeweekse dag. In het voorbeeld is per half uur een drie-cijferige code weergegeven, waarbij elk getal een betekenis heeft toegekend gekregen:

- 1° geeft de micro-omgeving aan (1=thuis-binnen, 2=elders-binnen, 3=in gemotor. voertuig, 4=drukke straat-buiten, 5=buiten)
- 2° geeft het inspanningsniveau aan (1=slaap, 2=weinig insp., 3=matig insp., 4=zeer inspannend)
- 3° geeft het soort activiteit aan (1=persoonlijke activiteiten, 2=huishoudelijk act., 3=boodschappen, 4=voor/met het kind, 5=onderwijs, 6=beroepsarbeid, 7=vrije tijd, 8=reizen)

Voor de 20 verschillende bevolkingsgroepen (2 geslachten x 5 leeftijdsgroepen x 2 werksituaties) zijn 10 verschillende activiteitenpatronen gebruikt. Aangenomen is dat bij kinderen onder de 10 jaar geen verschil is in activiteiten tussen jongens en meisjes. Alleen bij de leeftijdsgroep 20-64 jaar is onderscheid gemaakt naar werksituatie, bij de resterende groepen is verondersteld dat werksituatie of niet relevant is voor de groep, of dat de werksituatie niet daadwerkelijk het activiteitenpatroon beïnvloed.

In de beschreven exercitie (hoofdstuk 5) worden de volgende definities voor inspanningsniveaus gebruikt (Janssen et al. 1993):

*Slaap* zijn alle slaap en rust activiteiten.

Onder *weinig* inspannende activiteiten worden verstaan zittende en staande bezigheden, zoals lezen, tv-kijken, eten, afwassen

Onder *matig* inspannende bezigheden wordt verstaan activiteiten zoals fietsen, traplopen, wandelen.

Onder *inspannende* activiteiten wordt verstaan activiteiten waarbij gehijgd en/of getranspireerd wordt, zoals hardlopen, sporten, de tuin ompsitten.

Activiteiten naar inspanningsniveaus volgens de definities van Kleinman (1991):

*sleep*: slapen

*rest*: wakker maar inactief.

*light*: lopen en traplopen zonder belasting.

*moderate*: rustig hardlopen, traplopen met kleine last, grasmaaien

*heavy*: wedstrijd hardlopen, geulen graven, steile helling opfietsen.

STANDAARD ACTIVITEITENPATRONEN VOOR ZOMERSE DOORDEWEEKSE DAG

groep	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111
2	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111
3	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111
4	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111
5	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111
6	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111
7	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111
8	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111
9	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111
10	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111

groep:

1. kind, 0-4
2. kind, 5-9
3. man, 10-19
4. man, 20-64, werkend
5. man, 20-64, niet werkend
6. man, 65 +
7. vrouw, 10-19
8. vrouw, 20-64, werkend
9. vrouw, 20-64, niet werkend
10. vrouw, 65 +

micro-omgeving:

- 1 thuis, binnen
- 2 elders, binnen
- 3 in motorvoertuig
- 4 drukke straat, buiten
- 5 buiten
- inspanningsniveau:
- 1 slaap
- 2 weinig inspannend
- 3 matig inspannend
- 4 zwaar inspannend
- activiteiten:
- 1 persoonlijke activiteiten
- 2 huishoudelijke activiteiten
- 3 boodschappen
- 4 voor/ met kind
- 5 onderwijs
- 6 (beroeps)arbeid
- 7 vrije tijd
- 8 reizen

De gemiddelde vrouw van 65 jaar en ouder is tussen half twaalf en twaalf uur buiten, weinig inspannend bezig met een vrijetijdsbesteding, bijvoorbeeld buiten op het balkon een boek lezen.

De gemiddelde werkende man tussen 20 en 64 jaar, slaapt thuis tot 7 uur, tussen 7 en half 8 is hij matig inspannend bezig met persoonlijke activiteiten (opstaan, aankleden, douchen, ontbijten), tussen half 8 en 8 uur in reist hij in gemotoriseerd voertuig met weinig inspanning (gaat met auto naar zijn werk), tussen 8 en half een is hij elders binnen met weinig inspanning aan het werk, etc.

## Bijlage IV.

### Definities en dimensies van gebruikte symbolen

Symbool	Dimensies <sup>a</sup>	Definitie
a		Index: macro-omgeving
A		Activiteit- en inspanningsniveau
A		Index: activiteit; tijdbesteding
$C_{STPD}$	—	Relatie tussen het volume lucht bij een zekere vochtigheid, temperatuur en druk en het volume droge lucht bij standaard temperatuur en druk
C	$M.L^{-3}$	Concentratie van luvo-component (luchtkwaliteit)
D	$M.T^{-1}$	Dosissnelheid ( <i>dose-rate</i> )
D	M	Geïnhaleerde dosis ( <i>inhaled dose</i> )
E	$M.L^{-3}$	Werkelijke blootstelling ( <i>exposure</i> )
E		Index: uitademing, uitgeademd ( <i>exhaled</i> )
EPI		Index: epidemiologie
$f$		Functieaanduiding
f	$T^{-1}$	Ademfrequentie
i		Index: individu, individueel
I		Index: inademing, ingeademd ( <i>inhaled</i> )
j		Index: micro-omgeving
k	... <sup>b</sup>	Coëfficiënt in functies $f$
l	... <sup>b</sup>	Exponent in functies $f$
LK		Index: luchtkwaliteit
m	... <sup>b</sup>	Constante in functies $f$
M	M	Lichaamsgewicht
pop		Index: populatie
P	$M.L^{-3}$	Potentiële blootstelling ( <i>potential exposure</i> )
r		Index: regio, regionaal
R	... <sup>c</sup>	Respons, effect
SD		Sociaal demografisch gegevensbestand
t	T	Tijd
$\tau$	T	Middelingstijd
$\tau$		Index: middelingstijd
T	T	Integratietijd
T		Index: integratietijd; tidal (ademhaling)
TOX		Index: toxicologie



V	$L^3.T^{-1}$	Volumestroom ( <i>flow</i> )
V	$L^3$	Volume
$X_n$	—	Sociaal demografisch kenmerk

---

- a) M: eenheid van massa; L: eenheid van lengte; T: eenheid van tijd; blanco: n.v.t.; —: dimensieloos
- b) Afhankelijk van de betreffende functie
- c) Afhankelijk van de betreffende grootheid