

**KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT**

TECHNISCHE RAPPORTEN

T.R. - 57

A.A.M. Holtslag, F.T.M. Nieuwstadt en M.P. Scheele

Over de aanpassing van het Nationale verspreidingsmodel van
luchtverontreiniging voor hoge bronnen.

De Bilt, 1984

Publikatienummer: K.N.M.I. T.R. 57 (FM)

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut,
Fysisch Meteorologisch Onderzoek,
Postbus 201,
3730 AE De Bilt,
Nederland.

U.D.C.: 551.510.42 :
551.551

ISSN 0169-1708

Over de aanpassing van het Nationale verspreidingsmodel van
luchtverontreiniging voor hoge bronnen.

A.A.M. Holtslag
F.T.M. Nieuwstadt
M.P. Scheele

KNMI, de Bilt

september 1984

Inhoud

1. Inleiding
2. De menglaaghoogte
3. Pluimstijging
4. Modellen voor pluimpenetratie in inversies
5. Samenhang van pluimpenetratie met pluimstijging en menglaaghoogte
6. De verticale dispersiecoëfficiënten
7. Samenvatting van de voorgestelde veranderingen
8. Invloed van de voorstelde veranderingen op de gemiddelde concentraties rondom een hoge puntbron
9. Invloed veranderingen op hogere percentielen
10. Conclusies en slotwoord

Dankbetuiging

Literatuur

Tabellen 1 t/m 6

Figuren 1 t/m 3

1. Inleiding

Voor de berekening van grondconcentraties rondom een bron wordt in Nederland gebruik gemaakt van een Gaussisch pluimmodel, ook wel "Nationaal model" genoemd [16]. Dit model geeft seizoens- of jaargemiddelde concentraties tot een afstand van enkele tientallen kilometers van de bron. Daarnaast bestaat een methode voor de berekening van frequentieverdelingen van luchtverontreiniging [22]. In beide methodes worden aannames gedaan over atmosferische condities en verspreiding van luchtverontreiniging.

Bij gebruik van het Nationale model in de praktijk blijkt dat voor hoge bronnen de grondconcentraties sterk kunnen worden overschat [6,7,8]. Kennelijk leidt de combinatie van modelaannames hiertoe. Naar aanleiding hiervan heeft TNO op verzoek van het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer een studie verricht naar mogelijke aanpassingen van het model [6]. Deze studie stond onder begeleiding van de Werkgroep Verspreiding Luchtverontreiniging van de TNO Commissie Onderzoek Luchtverontreiniging. In deze werkgroep zijn overheid en industrie vertegenwoordigd. Ook het KNMI maakt deel uit van de werkgroep. In het verleden hebben de werkzaamheden van de werkgroep geleid tot de aanbevelingen in [16] en [22].

Op basis van de TNO studie [6] en bijdragen van KEMA [8] en KNMI [12], is binnen bovengenoemde werkgroep uitvoerig gediscussieerd over aanpassingen van het Nationale model. Met name de menglaaghoogte, de berekening van pluimstijging en pluimpenetratie in inversies heeft met de keuze van verticale dispersiecoëfficiënten centraal gestaan in de discussies. Daarbij was het uitgangspunt dat de beschrijving voor lage bronnen zoveel mogelijk ongewijzigd moest blijven.

In dit rapport worden de argumenten voor en tegen aanpassing van de verschillende aspecten van het model nog eens op een rij gezet. Als zodanig is dit rapport een bewerking van de KNMI bijdrage [12]. In dit rapport wordt echter dieper ingegaan op de berekening van de diverse factoren in het model. Ook wordt in afwijking van [6] een andere coëfficiënt voorgesteld in de berekening van pluimstijging bij stabiele omstandigheden.

Achtereenvolgens gaan we in dit rapport in op de menglaaghoogte, het berekenen van pluimstijging en criteria voor pluimpenetratie in inversies. Ook komt de samenhang van deze aspecten aan de orde. Daarna wordt ingegaan op de dispersiecoëfficiënten die in het Gaussisch pluimmodel kunnen worden gebruikt. Tot slot wordt na een discussie over de veranderingen, het een en ander

geïllustreerd met concentratieberekeningen rondom een hoge puntbron. Hierbij komt ook de aanbevolen methode voor het berekenen van frequentieverdelingen aan de orde [22].

2. De Menglaaghoogte

De menglaag is de onderste laag in de atmosfeer waarover menging van verontreiniging plaats vindt door turbulentie (zie [11]). In het Nationale model zijn de waarden van de menglaaghoogte gekoppeld aan de stabiliteitsklassen van Pasquill. De menglaaghoogte wordt echter naast de stabiliteit ook beïnvloed door andere factoren. Een van die factoren is de aanwezigheid van inversies op grotere hoogte, waardoor de menglaaghoogte kan worden beperkt.

Door Daan [4] is een onderzoek gedaan naar het voorkomen van inversies in De Bilt. De inversies in De Bilt worden representatief geacht voor een gebied boven land met een lengteschaal van 250 km. De hoogte van de inversiebasis blijkt uitermate veranderlijk te zijn per seizoen, synoptische situatie en windrichting.

Tevens blijkt uit [4] dat de windsnelheid nauwelijks gecorreleerd is met de hoogte van de inversiebasis. Daarintegen wordt in [8] voorgesteld om de menglaaghoogte z_i voor neutrale omstandigheden te bepalen uit:

$$z_i = 200 U_{10}^2 \quad (1)$$

waarbij U_{10} de 10 m windsnelheid voorstelt. Deze formule is gebaseerd op de neutrale schaalhoogte u_*^2/f (u_* is de wrijvingsnelheid, f is de Coriolis parameter; zie [18]). Volgens (1) varieert de menglaaghoogte tussen 200 m en 2000 m wanneer de 10 m windsnelheid toeneemt van 1 ms^{-1} tot 10 ms^{-1} .

De toepassing van (1) is alleen geoorloofd in neutrale omstandigheden die per definitie voorkomen in situaties met een kleine voelbare warmtestroom [18]. Bovendien moet de temperatuurgradient in de atmosfeer adiabatisch zijn. Wanneer er op grotere hoogte een inversie aanwezig is, dan wordt de menglaaghoogte hierdoor beperkt. In neutrale omstandigheden (stabiliteitsklasse D) wordt in het huidige model een vaste waarde voor z_i gekozen, nl. $z_i = 500$ m. Deze waarde komt goed overeen met typische waarden voor de hoogte van de inversiebasis, gegeven door Daan [4].

Op basis van de huidige theorie kan de menglaaghoogte worden uitgerekend met fysisch gefundeerde modellen. Hiervoor zijn schattingen voor de turbulentieparameters in de menglaag nodig [11]. Binnen het huidige Nationale model zijn deze schattingen niet voorhanden. Voorgesteld wordt daarom om de huidige indeling van menglaaghoogten te handhaven, zolang waarden voor de turbulentieparameters niet in het Nationale model zijn opgenomen.

3. Pluimstijging

In het algemeen zal pluimstijging plaats vinden, wanneer een pluim na lozing uit de bron warmer is dan zijn omgeving. Hierdoor kan de hoogte van een bron effectief worden vergroot. Voor de berekening van de pluimstijging worden in het Nationale model de formules van Briggs toegepast [2,16]. Deze formules worden gegeven door:

$$\Delta h = 109 \frac{Q_H^{3/4}}{U} ; Q_H < 6 \text{ MW} , \quad (2)$$

$$\Delta h = 143 \frac{Q_H^{3/5}}{U} ; Q_H \geq 6 \text{ MW} , \quad (3)$$

en

$$\Delta h = c_1 \left(\frac{Q_H}{U} \right)^{1/3} , \quad (4)$$

met $c_1 = 115$. (zie [16]). Hierin is Δh de pluimstijging (m), Q_H de warmte-emissie van de bron (MW) en U de windsnelheid op bronhoogte (ms^{-1}). De effectieve schoorsteenhoogte (H) wordt hierbij gegeven door $H = h + \Delta h$, met h de schoorsteenhoogte.

De formules (2) en (3) gelden in principe voor een neutrale atmosfeer met een adiabatistische temperatuurgradient. Formule (4) geldt voor een licht stabiele atmosfeer met een temperatuurgradient van -0.006 Km^{-1} .

In het Nationale model wordt de pluimstijging in principe berekend met (2) of (3). De definitieve waarde voor Δh wordt voor alle stabiliteitsklassen naar boven toe begrensd door de waarde berekend met (4), waarin $c_1 = 115$. Door de KEMA wordt in [8] voorgesteld deze begrenzing van de pluimstijging in neutrale en onstabiele situaties (stabiliteitsklassen A t/m D) niet meer toe

te passen. Zolang de pluim zich in de neutrale of onstabiele menglaag bevindt, is de temperatuurgradient namelijk gering. In die gevallen zijn (2) en (3) dus direkt toepasbaar zonder begrenzing van [4].

Door Briggs [3] zijn in een meer recente studie nieuwe pluimstijgingsformules geïntroduceerd. Met name voor neutrale situaties met veel wind wordt een andere formule gevonden. Briggs concludeert echter dat deze formule voor de definitieve pluimstijging niet veel afwijkt van (2) en (3). Bovendien wordt door Manins [15] een goede overeenkomst gevonden tussen (2) en (3) en laboratorium resultaten in neutrale omstandigheden. Ook in onstabiele omstandigheden worden door Briggs een aantal nieuwe formules voorgesteld. Deze formules zijn gebaseerd op convectieve schaling in de menglaag. Voor de toepassing hiervan is ondermeer de voelbare warmtestroom nodig. Deze grootte is echter in het Nationale model niet voorhanden, zodat toepassing van de nieuwe formules voorlopig achterwege moet blijven.

Voor de berekening van de pluimstijging in stabiele omstandigheden is het volgende van belang. Hiervoor kunnen we (4) gebruiken. Zoals hierboven werd vermeld is (4) met $c_1 = 115$ geldig voor een licht stabiele atmosfeer. De hierbij gebruikte temperatuurgradient is echter alleen representatief op grotere hoogte. In de stabiele menglaag zal in het algemeen de temperatuurgradient groter zijn. Dit betekent dat c_1 in (4) moet worden aangepast.

Voor de aanpassing van c_1 in (4) schrijven we (4) in zijn oorspronkelijke vorm

$$\Delta h = c_2 \left(\frac{F}{US} \right)^{1/3}, \quad (5)$$

zoals door Briggs [2,10] werd voorgesteld. Hierin is F gerelateerd aan Q_H (zie paragraaf 4) en S is gedefinieerd door

$$S = \frac{g}{T} \frac{\partial \theta}{\partial z} \approx \left(\frac{\partial T}{\partial z} + 0.01 \right). \quad (6)$$

In (6) is g de zwaartekrachtsversnelling ($g = 9.82 \text{ ms}^{-2}$), T de omgevings-temperatuur, $\partial \theta / \partial z$ de potentiële temperatuurgradient en $\partial T / \partial z$ de actuele temperatuurgradient.

Aan de hand van waarnemingen verricht aan de KNMI meetmast te Cabauw, kunnen we een indruk krijgen van de gemiddelde temperatuurgradient $\partial T / \partial z$ over de stabiele menglaag. De menglaaghoogte stellen we hierbij op 200 m, zoals die

nu in het model voor de klassen E en F gebruikt wordt. Tabel 1 geeft de resultaten voor het meetjaar 1977/1978 van $\partial T/\partial z$ tussen 200 m en 10 m.

Uit tabel 1 zien we dat de waarden van $\partial T/\partial z$ voor E en F onderling weinig verschillen. Bovendien is de standaardafwijking σ in $\partial T/\partial z$ per klasse erg groot. Daarom lijkt een onderverdeling naar stabiliteitsklasse weinig zinvol, zoals in [6] wordt gesuggereerd. Met $\partial T/\partial z = 0.0065 \text{ Km}^{-1}$ volgt uit (4), (5) en (6) $c_1 = 65$. Hierbij is $c_2 = 2.6$ gekozen, zoals in [10] wordt gegeven in afwijking van $c_2 = 2.9$ volgens [16]. Daarnaast hebben we gebruik gemaakt van $T = 288 \text{ K}$ en $F \approx 8.8 Q_H$, zoals in het Nationale model [16].

Samenvattend wordt dus nu voorgesteld om in neutrale en onstabiele omstandigheden (klassen A t/m D) de pluimstijging te berekenen uit (2) en (3) zonder pluimstijgingsbegrenzing van (4). Voor stabiele omstandigheden (E en F) wordt voorgesteld Δh te berekenen met (4) waarin $c_1 = 65$, zonder tussenkomst van (2) of (3). In paragraaf 8 wordt de invloed van deze veranderingen voor een hoge puntbron besproken.

In het bovenstaande is nog geen rekening gehouden met de belemmerende werking van een inversie boven de menglaag. Hieraan wordt in de volgende paragraaf aandacht besteed.

4. Modellen voor pluimpenetratie in inversies

In het algemeen zal een pluim stijgen zolang de pluim warmer is dan zijn omgeving. Dit geldt ook bij de aanwezigheid van een inversie boven de menglaag. Door de andere temperatuuropbouw in de inversie zal de pluim echter minder snel stijgen dan in de menglaag. Bij een sterke inversie moet de pluim voldoende stijgkracht bezitten om door de inversie heen te kunnen dringen.

In het Nationale model wordt verondersteld dat de pluim volledig boven de menglaag komt, als voldaan wordt aan $H > 1.5 z_i$. Hierin is $H = h + \Delta h$, met h de schoorsteenhoogte en Δh de berekende pluimstijging. Verder is z_i de menglaaghoogte voor een bepaalde stabiliteitsklasse. Voor $z_i \leq H \leq 1.5 z_i$ wordt verondersteld dat de pluim volledig in de menglaag blijft.

De criteria in het Nationale model houden dus geen rekening met gedeeltelijke penetratie. Bovendien wordt geen rekening gehouden met de sterkte van de inversie boven de menglaag. Daarnaast blijkt de keuze van " $H > 1.5 z_i$ " voor discussie vatbaar. In [8] wordt " $H > z_i$ " voorgesteld als

criterium voor volledige penetratie. Discussie over deze factoren heeft geleid naar voorstellen voor meer fysisch gefundeerde criteria. Hieronder zullen we twee van dergelijke voorstellen uit de literatuur samenvatten.

Het eerste voorstel is afkomstig van Manins [15]. Hij stelt dat penetratie van een pluim in de inversie plaats vindt, als ter plaatse van de inversie geldt: $b_s > b_i$. Hierin is b_s de "pluimbuoyancy" en b_i de inversiesterkte. Deze parameters worden gedefinieerd door:

$$b_i = g \frac{\Delta\theta_i}{T} , \quad (7)$$

met $\Delta\theta_i$ de potentiële temperatuursprong over de inversie, T de omgevingstemperatuur en g de versnelling van de zwaartekracht.

De pluimbuoyancy b_s wordt gegeven door:

$$b_s = g \frac{(\theta_s - \theta_a)}{T} , \quad (8)$$

met θ_s de potentiële temperatuur van de pluim en θ_a de potentiële temperatuur van de omgeving. De pluimbuoyancy b_s vormt samen met het dwarsoppervlak A_s en de snelheid W_s in de pluim, de buoyancy flux F . De definitie van F luidt [10]:

$$F = b_s A_s W_s , \quad (9)$$

hetgeen te schrijven is als:

$$F = \frac{g Q_H}{T \rho C_p} . \quad (10)$$

Hierin is Q_H de warmte-emissie van de bron, ρ de dichtheid van de pluim en C_p de specifieke warmte bij constante druk. Met $T = 288$ K leidt dit tot $F = 8.8 Q_H$, waarin Q_H in MW.

In het door Manins [15] opgestelde model wordt rekening gehouden met verschillen in verticale snelheid en buoyancy in de pluim. Ook wordt rekening gehouden met het overhellen van de pluim door de zijdelingse wind U in de menglaag. Nu vindt penetratie van de pluim plaats als aan bepaalde waarden van de parameter P voldaan wordt. Hierbij wordt P gegeven door:

$$P = \frac{F}{U b_i \delta^2} , \quad (11)$$

met $\delta = z_1 - h$ (z_1 de hoogte van de inversie en h de bronhoogte).

Volledige penetratie van de pluim vindt plaats voor $P > 0.325$ ($f = 0$), terwijl geen penetratie plaats vindt voor $P < 0.08$ ($f = 1$). Voor tussenliggende waarden van P blijft een fractie f van de pluimmassa in de menglaag, waarbij f gegeven wordt door:

$$f = \frac{0.08}{P} - (P - 0.08), \quad (12)$$

met $0 < f < 1$. Vergelijking (12) stemt goed overeen met laboratorium experimenten en geeft bevredigende overeenstemming met dispersie-experimenten in de atmosfeer [15].

Het tweede voorstel voor pluimpenetratie is afkomstig van Briggs (zie [10]). Zijn criteria luiden als volgt. De pluim blijft volledig in de menglaag ($f = 1$) als:

$$1.5 \Delta h \leq \delta. \quad (13)$$

Daarintegen komt de pluim volledig boven de menglaag ($f = 0$) voor

$$0.5 \Delta h \geq \delta. \quad (14)$$

Voor tussenliggende waarden wordt f gegeven door:

$$f = \frac{\delta}{\Delta h} - 0.5 \quad ; \quad 0.5 \leq \frac{\delta}{\Delta h} \leq 1.5. \quad (15)$$

De criteria van Briggs zijn gebaseerd op het feit dat vaak de pluimbreedte na volledige en ongehinderde stijging van de orde Δh is. Eenvoudige meetkundige inzichten leiden dan tot (13) en (14). Hierbij wordt dus geen rekening gehouden met de sterkte van de inversie boven de menglaag. Dit laatste vormt een fysische beperking van de criteria gegeven door (13)-(15).

Voor beide voorstellen van pluimpenetratie lijkt het realistisch om bij (gedeeltelijke) pluimpenetratie de effectieve bronhoogte gelijk te stellen aan de menglaaghoogte, d.w.z.

$$H = z_1. \quad (16)$$

De effectieve bronsterkte Q' wordt bij gedeeltelijke pluimpenetratie

$$Q' = fQ, \quad (17)$$

met Q de oorspronkelijke emissiesterkte van de bron.

In de volgende paragraaf zullen we de voorstellen voor pluimpenetratie in inversies met elkaar vergelijken. Ook wordt de samenhang met de keuze van de menglaaghoogte en de berekening van de pluimstijging besproken.

5. Samenhang van pluimpenetratie met pluimstijging en menglaaghoogte.

In deze paragraaf zullen we de voorstellen van pluimpenetratie aan de hand van een eenvoudig praktisch voorbeeld toelichten. We gebruiken hiervoor de testbron in [8]. Deze bron is 150 m hoog, met respectievelijk een warmte-emissie $Q_H = 67$ MW en $Q_H = 100$ MW. De stabiliteit van de atmosfeer wordt neutraal gekozen volgens klasse D van het Nationale model. Deze klasse komt in meer dan 70% van de gevallen voor en zal dus een grote invloed hebben op het eindresultaat. De klasse D is verdeeld in drie snelheidsklassen D_1 , D_2 en D_3 .

In tabel 2 zijn de resultaten van de berekeningen voor pluimpenetratie met de testbron samengevat. De resultaten worden gegeven in de vorm van de fractie f van de pluim die in de menglaag blijft. Bij de berekening van f volgens Manins (f_1) is gerekend met twee waarden voor de temperatuurtoename in de inversie $\Delta\theta_i$. De waarde $\Delta\theta_i = 2$ K is een representatieve waarde voor een groot aantal omstandigheden, maar $\Delta\theta_i = 5$ K wordt vaak geobserveerd bij hoge druk gebieden [zie 4]. De windsnelheid is berekend op bronhoogte (U_{150}) met behulp van het Nationale model [16]. De menghoogte voor klasse D wordt aangenomen op $z_i = 500$ m. Tevens is de pluimstijging volgens (3) en (4) gegeven in tabel 2.

Uit tabel 2 zien we dat de pluim volgens het model van Manins bij deze bron steeds in de menglaag blijft ($f_1 = 1$), voor beide waarden van $\Delta\theta_i$. Dit resultaat wordt vaak voor deze bron ook gevonden met het criterium " $H > 3/2 z_i$ " in het Nationale model ($f_2 = 1$) wanneer we aannemen dat de pluimstijging begrensd wordt door (4) met $c_1 = 115$. Wanneer we de pluimstijging berekenen met (3) dan blijkt in klasse D_1 de pluim boven de menglaag te komen ($f_3 = 0$).

Verder zijn in tabel 2 de resultaten van de Briggs criteria (13)-(15) gegeven. Hierbij is de pluimstijging berekend met (3) en (4) met $c_1 = 115$. Deze worden respectievelijk gegeven door f_4 en f_5 . We zien dat gedeeltelijke penetratie plaats vindt in klassen D_1 en D_2 . Tot slot zijn de resultaten van " $H > z_i$ " met pluimstijging volgens (3) gegeven (f_6). Dit laatste wordt gesuggereerd in [8].

Met behulp van tabel 2 zien we dat de resultaten van de criteria voor pluimpenetratie sterk beïnvloed worden door de keuze van de pluimstijgingsformule. Ook de invloed van de menglaaghoogte kan groot zijn. Nemen we als voorbeeld $z_i = 200$ m voor de stabiele klassen E en F, dan kan men berekenen dat voor alle gevallen van tabel 2 (gedeeltelijke) pluimpenetratie plaatsvindt.

Tot slot de keuze van het criterium voor pluimpenetratie uit de zes besproken alternatieven. Het voordeel van de criteria volgens Manins (f_1) en Briggs (f_4, f_5) is, dat f in principe continu wordt gegeven in afhankelijkheid van de beschouwde parameters. Daarbij heeft het model van Manins een duidelijke fysische achtergrond. Bovendien wordt dit model bevestigd door laboratoriummetingen en atmosferische gegevens.

Gezien het bovenstaande is er een voorkeur voor de inpassing van het model van Manins [15] in het Nationale model. Als typische waarde voor de inversiesterkte $\Delta\theta_i$ wordt $\Delta\theta_i = 2$ K aanbevolen. Bij gedeeltelijke penetratie van de pluim in de inversie worden (16) en (17) aanbevolen voor de effectieve bronhoogte en de effectieve bronsterkte.

6. De verticale dispersiecoëfficiënten

In het voorgaande hebben we de samenhang van pluimstijging, menghoogte en pluimpenetratie beschouwd. In deze paragraaf bespreken we de invloed van de verticale dispersiecoëfficiënten. Deze coëfficiënten zijn een maat voor de verticale breedte van de pluim in de menglaag. De breedte van de pluim neemt toe tijdens het transport van de pluim. Dit wordt bepaald door de aanwezigheid van turbulentie in de menglaag.

In het huidige Nationale model worden de dispersie coëfficiënten van Pasquill gebruikt voor lage bronnen (effectieve hoogte $H < 10$ m). Voor hoge bronnen ($100 \leq H < 400$ m) worden in het Nationale model de

dispersiecoëfficiënten volgens Singer en Smith gebruikt. Voor zeer hoge bronnen ($H > 400$ m) wordt geen uitspraak gedaan.

Recent onderzoek wijst op een redelijke overeenstemming tussen de Pasquill dispersiecoëfficiënten en waarnemingen voor hoge bronnen in met name neutrale situaties [5,9,14]. Dit geldt overigens alleen voor de gemiddelde concentratie berekend over meerdere experimenten. Voor een individueel geval kunnen grote afwijkingen voorkomen [5,20].

Niettemin lijkt gebruik van de Pasquill-coëfficiënten ook voor hoge bronnen meer voor de hand te liggen dan toepassing van de Singer en Smith coëfficiënten. In toepassingen van het Gaussisch pluimmodel voor het Rijnmondgebied wordt hierop ook gewezen (zie [6] en [7]). Ook voor zeer hoge bronnen wordt aangenomen dat de Pasquill-coëfficiënten redelijk geschikt zijn.

Ter illustratie van de invloed van de verticale dispersiecoëfficiënten, zijn in de figuren 1 en 2 de jaargemiddelde concentratiepatronen rondom een hoge puntbron gegeven. In figuur 1 is gerekend met de Singer en Smith coëfficiënten volgens het huidige Nationale model, terwijl in figuur 2 de Pasquill coëfficiënten zijn gebruikt. Alle andere factoren zijn in de figuren 1 en 2 conform het huidige Nationale model [16]. De berekeningen zijn gedaan met de testbron van paragraaf 5 ($h = 150$ m, $Q_H = 67$ MW), in een vierkant met een zijde van 24 km rondom de bron. De ruwheidscorrectie op de Pasquill-coëfficiënten is toegepast voor een ruwheidslengte van $z_0 = 0.25$ m. Verder is de klimatologie van Schiphol gebruikt. De emissie van de bron Q is gesteld op $Q = 1 \text{ kg s}^{-1}$.

Bij vergelijking van de figuren 1 en 2 blijkt overduidelijk de grote invloed van de verticale dispersiecoëfficiënten (σ_z). Allereerst valt op dat het concentratiepatroon duidelijk verandert. Bovendien ligt de maximum-concentratie bij gebruik van de Singer en Smith coëfficiënten dichterbij de bron. Dit is te verklaren door het feit dat σ_z volgens Singer en Smith duidelijk groter is dan σ_z volgens Pasquill. De pluim raakt daardoor in het model op kortere afstand de grond. Hierdoor nemen ook de concentraties in de buurt van de bron toe. Op grotere afstand, wanneer de pluim over de menglaag gemengd is, doet de waarde van σ_z er niet meer toe. Dit wordt in paragraaf 8 nader besproken.

De bovenstaand besproken dispersiecoëfficiënten worden ingedeeld naar de stabiliteitsklassen van Pasquill. Door Weil en Brower [21] en door Berkowicz en anderen [1] worden de onstabiele klassen echter opnieuw gedefinieerd.

Hiervoor is ondermeer de voelbare warmtestroom nodig. Zoals eerder besproken is deze parameter in het huidige Nationale model niet voorhanden. Dit feit kan de toepassing van de dispersiecoëfficiënten voor onstabiele omstandigheden compliceren. Op basis van de nieuwe definitie blijkt de menglaag namelijk vaker onstabiel te zijn dan op basis van de Pasquill-klassen volgt.

Gezien het voorgaande wordt geadviseerd om voorlopig de verticale dispersiecoëfficiënten volgens Pasquill te gebruiken voor alle bronhoogten. In een toekomstige opzet van het Nationale model kan de verticale dispersie waarschijnlijk beter worden beschreven. Hiervoor zijn dan directe schattingen van de turbulente parameters nodig in het model [11].

7. Samenvatting van de voorgestelde veranderingen

In dit rapport hebben we verschillende mogelijkheden voor de aanpassing van het Nationale model voor hoge bronnen bekeken. Over deze aspecten is in de Werkgroep Verspreiding Luchtverontreiniging uitvoerig gediscussieerd. In deze paragraaf worden de voorgestelde veranderingen samengevat.

Voor de berekening van de pluimstijging lijkt het aannemelijk om de pluimstijgingsbegrenzing door (4) in onstabiele en neutrale situaties te laten vallen. De pluimstijging wordt dan berekend met de oorspronkelijke door Briggs voorgestelde formules (2) en (3). In stabiele situaties wordt voorgesteld de pluimstijging te berekenen met (4) waarin de evenredigheidscoëfficiënt $c_1 = 65$ gekozen wordt (klassen E en F). Zolang de stabiliteitsclassificatie van Pasquill gehandhaafd blijft, ligt verandering van de menglaaghoogten niet voor de hand.

Het criterium voor pluimpenetratie in inversies blijkt gevoelig voor de waarde van de menglaaghoogte en de keuze van de formule voor pluimstijgingsformules. Het model van Manins voor pluimpenetratie heeft een duidelijke fysische achtergrond. Bovendien wordt dit model bevestigd door laboratoriummetingen en atmosferische gegevens. Daardoor is er een voorkeur voor de inpassing van dit model in het Nationale model. Als typische waarde voor de inversie sterkte wordt $\Delta\theta_1 = 2 \text{ K}$ aanbevolen.

Andere wijzigingen in het Nationale model hebben betrekking op de verticale dispersiecoëfficiënten (σ_z) voor hoge bronnen. Uit paragraaf 6 blijkt echter dat ook voor hoge bronnen en zeer hoge bronnen de Pasquill

dispersiecoëfficiënten redelijk geschikt moeten worden geacht voor de berekening van lange termijn gemiddelden. Dit betekent een grote verandering ten opzichte van het huidige model [16], zoals in de figuren 1 en 2 werd geïllustreerd voor een hoge puntbron.

In het voorgaande is nog niet gesproken over het windprofiel in de menglaag. Hiervoor wordt in het Nationale model een machtwet gebruikt met een vaste exponent per stabiliteitsklasse. Zoals besproken in [11] en [13] is de machtwet zuiver empirisch en mist het een theoretische basis. Zolang de huidige stabiliteitsclassificatie gehandhaafd blijft is er echter nauwelijks een alternatief. Wel wordt in [10] geadviseerd om de machtwet niet meer boven 200 m toe te passen. Daarboven kan als eerste benadering de berekende waarde op 200 m gebruikt worden.

De transportsnelheid van de pluim wordt in het huidige model berekend met een interpolatieprocedure, waarin naast effectieve bronhoogte ook de verticale dispersiecoëfficiënt σ_z en de menglaaghoogte een rol spelen [16]. Dit is nodig, wanneer voor hoge en lage bronnen gerekend wordt met verschillende dispersiecoëfficiënten. Hierboven wordt echter voor alle bronhoogten de Pasquill coëfficiënten voorgesteld. In dat geval kan de transportsnelheid direkt op effectieve bronhoogte worden uitgerekend met de machtwetformule en de hieraan verbonden restrictie boven 200 m.

Tot slot de invloed van de menglaaghoogte op grotere afstand van de bron. Hiervoor is in het huidige model een factor C_{LS} ingevoerd die er voor zorgt dat de pluim uniform verdeeld wordt over de menglaag. Dit gebeurt nu bij $\sigma_z/z_i > 0.9$, waarbij z_i de menglaaghoogte voorstelt. In [6] wordt echter geadviseerd om dit te wijzigen in $\sigma_z/z_i > 1.6$. Daarmee wordt voorkomen dat er op grotere afstand een knik in het concentratieprofiel ontstaat.

8. Invloed van de voorgestelde veranderingen op de gemiddelde concentraties rondom een hoge puntbron

In deze paragraaf worden de voorgestelde veranderingen van paragraaf 7 geïllustreerd voor de hoge puntbron van de paragrafen 5 en 6. In de figuren 1 en 2 is al de invloed van de verticale dispersiecoëfficiënt σ_z aan de orde gekomen. In figuur 3 zijn ook de andere veranderingen van paragraaf 7 doorgevoerd. We zien dat de patronen van de figuren 2 en 3 ongeveer

overeenstemmen. De verschillen die optreden zijn met name het gevolg van de veranderde pluimstijging en de gewijzigde berekening van de transportsnelheid boven 200 m.

Ter vergelijking zijn in tabel 3 voor het oude model en het aangepaste model de pluimstijging en de fractie f van de pluim in de menglaag gegeven. We zien dat f voor beide modellen gelijk is, terwijl de pluimstijging duidelijk varieert. Met name in de lage windsnelheidsklassen (index 1) wordt voor het aangepaste model de pluimstijging duidelijk hoger in onstabiele en neutrale situaties. Dit is het gevolg van het wegvallen van de begrenzing.

In tabel 4 zijn voor 3 receptor punten de berekende jaargemiddelde concentraties gegeven voor de 3 modelversies van de figuren 1 t/m 3. Twee van de receptorpunten vallen samen met de locaties van de maximum-concentratie in de figuren 1 en 2 (noordoostelijk van de bron op 4.1 en 10.6 km). Het derde punt is ter illustratie gekozen op 35.4 km afstand in noordoostelijke richting.

We zien uit tabel 4 dat op de plaats waar volgens het oude model het maximum valt (receptorpunt a), de nieuwe modelversie een factor 10 lagere concentratie geeft. In receptorpunt b is dit echter maar een factor 1.5. Vergelijking tussen de maxima van het oude en het nieuwe model geeft een factor 3 tussen de punten a (oude model) en b (nieuwe model). Op grotere afstand (receptorpunt c) zijn de gemiddelden voor het oude model en het oude model met andere σ_z gelijk. De verticale dispersiecoëfficiënt σ_z is op deze afstand niet meer van belang doordat de pluim uniform over de menglaag verdeeld is. Het nieuwe model met alle aanpassingen van paragraaf 7, leidt op grote afstand in receptorpunt c tot een ~ 7 % hogere waarde voor de grondconcentratie.

9. Invloed van de voorgestelde veranderingen op hogere percentielen

In de vorige paragraaf hebben we gesproken over lange termijn gemiddelde concentraties. In deze paragraaf gaan we de invloed van de veranderingen in het model na op de hogere percentielen. Een percentiel wordt als volgt gedefinieerd: De waarde van het p -percentiel is de concentratie die in $(1-p)$ 100 % van de gevallen wordt overschreden.

In Nederland bestaat een aanbevolen methode [22] voor de berekening van

met name het 95 en 98 percentiel. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de lange termijn gemiddelde concentratie. Daarnaast zijn in de berekeningen ook de horizontale verspreidingscoëfficiënten (σ_y) van belang. In de methode worden voor hoge bronnen, de waarden volgens Singer en Smith gebruikt. Deze waarden zijn over het algemeen lager dan de waarden voor σ_y berekend met de Pasquill coëfficiënten (voor een ruheidslengte van 3 cm of meer).

In de tabellen 5 en 6 zijn de 95 en 98 percentielwaarden gegeven in de drie receptorpunten a, b en c van de vorige paragraaf. Deze berekeningen zijn gedaan met de aanbevolen methode in [22], waarbij voor de horizontale dispersiecoëfficiënten (σ_y) de waarden volgens Singer en Smith zijn gekozen. Dit is gebeurd voor de oude en nieuwe modelversies. Daarnaast is voor de nieuwe modelversie ook gerekend met σ_y volgens Pasquill. De achtergrond concentratie is nul gesteld.

Uit de tabellen 5 en 6 blijkt dat de verschillen voor het 95 en 98 percentiel met het oude en het nieuwe model groot zijn. Daarintegen blijkt de waarde van σ_y in deze voorbeelden van geringere betekenis te zijn voor de uitkomst. Dit betekent dat de belangrijkste invloed uitgaat van de wijzigingen in het model, zoals samengevat in paragraaf 7. Met name de keuze van σ_z beïnvloed de uitkomst van zowel het lange-termijn gemiddelde als de hogere percentielen. Merk op dat voor het 95 percentiel een factor 3 verschil wordt gevonden tussen het oude model in receptorpunt a en het nieuwe model in receptorpunt b. Deze factor werd ook gevonden voor de lange termijn gemiddelden in deze punten.

Op basis van de tabellen 5 en 6 is moeilijk een definitieve keuze te maken voor de te gebruiken waarden van σ_y . Experimenteel onderzoek van KNMI en KEMA te Cabauw geeft aan dat de Pasquill waarden een overschatting geven van de verspreiding bij hoge bronnen [5,20]. Deze experimenten werden gedaan in overwegend neutrale en onstabiele omstandigheden. Daarintegen geeft gebruik van de Singer en Smith coëfficiënten voor σ_y minstens een verschil van dezelfde orde van grootte met de waarnemingen. In stabiele omstandigheden kan bovendien de winddraaiing met de hoogte invloed uitoefenen op de dispersie.

Vanuit experimenteel oogpunt is dus ook geen duidelijke keuze te maken voor de waarden van σ_y . Bij het modelleren van de verspreiding uit hoge bronnen bestaat echter een lichte voorkeur voor de Pasquill-coëfficiënten, omdat deze ook voor de lage bronnen worden gebruikt. Deze keuze stemt echter niet overeen met de aanbevolen methode in [22]. Bij een nieuwe opzet van het Nationale model in de toekomst, kan naar alle waarschijnlijkheid een beter

gefundeerde keuze gemaakt worden [11,14].

10. Conclusies en slotwoord

In dit rapport zijn een aantal voorstellen besproken voor de wijziging van het Nationale model voor hoge bronnen. Deze voorstellen zijn uitvoerig besproken in de Werkgroep Verspreiding Luchtverontreiniging aan de hand van eerdere rapporten [6,8,12]. De voorstellen zijn samengevat in paragraaf 7. Het nieuwe model met deze voorstellen is operationeel op de KNMI computer [19].

Aan de hand van een voorbeeld voor een hoge puntbron, hebben we laten zien dat de voorgestelde veranderingen een grote invloed kunnen hebben op de waarde en de plaats van de maximale lange termijn gemiddelde concentratie. Ook de hogere percentiel-waarden worden beïnvloed. De grootste verandering wordt veroorzaakt door de keuze van de verticale dispersiecoëfficiënten (σ_z) volgens Pasquill voor hoge bronnen. In [6] en [7] wordt de invloed van deze coëfficiënten besproken voor berekeningen waarbij het gehele Rijnmondgebied is betrokken.

De voorstellen in dit rapport zijn bedoeld als tussenoplossing. Op dit moment zijn er ontwikkelingen gaande voor een verbeterde beschrijving van de dispersie [18]. Voor de toepassing van deze theorie zijn schattingen nodig van de turbulentieparameters in de menglaag [11]. Daarbij horen tevens verbeterde beschrijvingen voor het wind- en temperatuurprofiel in de menglaag [13]. Hierover wordt op het KNMI volop onderzoek verricht. We verwachten dat de theorie over enkele jaren praktisch toepasbaar is. Dan kan een nieuwe opzet van het Nationale model worden ingevoerd.

Dankbetuiging

De directie Lucht van het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM) heeft financieel bijgedragen bij de uitvoering van deze studie.

Literatuur

- [1] R. Berkowicz, J.H. Baerentsen, A.b. Jensen, J.S. Markvorsen, L.B. Nielsen, H.R. Olesen, L.P. Prahm, 1983: "An operational air pollution model", Preprints International Technical meeting, 27-30 sept., Copenhagen. (To be published by Plenum).
- [2] G.A. Briggs, 1969: "Plume rise", U.S. Depart. of Commerce report TID-25075, Springfield, 81 p.
- [3] G.A. Briggs, 1975: "Plume rise predictions", in: Lectures on Air Pollution and Environmental impact analysis, American Meteorological Society, Boston.
- [4] H. Daan, 1974: "Temperatuurinversies: een onderzoek naar het ontstaan, het gedrag en het voorkomen naar inversies in de onderste lagen van de atmosfeer boven Nederland", Wetenschappelijk Rapport WR 74-6, KNMI, De Bilt, 52 p.
- [5] H. van Duuren en F.T.M. Nieuwstadt, 1980: "Dispersion from the 213 m high meteorological mast at Cabauw in the Netherlands", in: Studies in Environmental Science, 8, Elsevier, Amsterdam, p. 77-90.
- [6] N.J. Duym, 1984: "Verspreiding uit hoge schoorstenen: Studie naar een uitbreiding van het Nationale model", MT-TNO rapport 84-03755, 75 p.
- [7] C.A. Engeldal en F.T.M. Nieuwstadt, 1978: "Toepassing van het Gaussisch pluimmodel voor de berekening van korte-termijn gemiddelden in het Rijnmondgebied", KNMI Wetenschappelijk Rapport WR 78-2, 62 p.
- [8] J.J. Erbrink en R. Steenkist, 1983: "Aanpassing nationale lange termijn verspreidingsmodel voor hoge bronnen", Rapport 7995-83 MO-L, KEMA, Arnhem, 15 p.
- [9] S.E. Gryning, 1981: "Elevated source SF₆-tracer dispersion experiments in the Copenhagen area", Risø National Lab., report R-446, Roskilde, Denmark, 187 p.

- [10] S.R. Hanna, G.A. Briggs, R.P. Hosker, 1982: " Handbook on Atmospheric Diffusion", Technical Information Center, US Department of Energy, Virginia, 102 p.
- [11] A.A.M. Holtslag en A.P. van Ulden, 1983: "De meteorologische aspecten van luchtverontreinigingsmodellen: eindrapport van het project klimatologie verspreidingsmodellen", Wetenschappelijk Rapport WR 83-4, KNMI De Bilt, 71 p.
- [12] A.A.M. Holtslag en F.T.M. Nieuwstadt, 1983: "Over de aanpassing van het Nationale verspreidingsmodel van luchtverontreiniging voor hoge bronnen", KNMI concept-rapport, De Bilt, 12 p. (discussiestuk werkgroep Verspreiding Luchtverontreiniging, 22 november 1983, niet gepubliceerd).
- [13] A.A.M. Holtslag, 1984: "Estimates of diabatic wind speed profiles from near-surface weather observations", Boundary-Layer Meteorology (in press).
- [14] J.S. Irwin, 1983: "Estimating plume dispersion - A comparison of several sigma schemes", J. Clim. Appl. Meteor., 22, 92-114.
- [15] P.C. Manins, 1979: "Partial penetration of an elevated inversion layer by chimney plumes", Atm. Env. 13, 733-741.
- [16] Modellen voor de verspreiding van luchtverontreiniging inclusief aanbevelingen voor de waarden van parameters in het Lange termijn model, 1976, Staatsuitgeverij, den Haag, 93 p.
- [17] P.A.T. Nieuwendijk, C.A. Engeldal en F.T.M. Nieuwstadt, 1976: "Handleiding voor het computerprogramma van het Gaussisch pluimmodel", KNMI Wetenschappelijk Rapport WR 76-16, 65 p.
- [18] F.T.M. Nieuwstadt en H. van Dop (eds.), 1982: "Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling", Reidel, Dordrecht, 358 p.

- [19] M.P. Scheele en A.A.M. Holtslag, 1984: "Handleiding voor het computer-programma van het Gaussisch pluimmodel met percentielberekeningen", KNMI Technisch Rapport (in voorbereiding).
- [20] R. Steenkist en F.T.M. Nieuwstadt, 1981: " Dispersion near to a tall stack". In: Air pollution modeling and its application, Plenum, New York, 357-367.
- [21] J.C. Weil en R.C. Brower, 1982: "The Maryland PPSP dispersion model for tall stacks", Maryland Power Plant siting Program, Baltimore.
- [22] Werkgroep Verspreiding Luchtverontreiniging, 1981: "Frequentieverdelingen van luchtverontreinigingsconcentraties: Een aanbeveling voor een rekenmethode", Staatsuitgeverij, Den Haag, 61 p.

Tabel 1

De gemiddelde temperatuurgradient $\partial T/\partial z$ tussen 200 m en 10 m voor stabiliteitsklassen E en F van Pasquill. Hierbij is n het aantal uren waarover gemiddeld is en σ de standaard afwijking in $\partial T/\partial z$. De gegevens zijn gebaseerd op waarnemingen te Cabauw van 1 maart 1977 tot 1 maart 1978.

	n	$\partial T/\partial z$ (Km ⁻¹)	σ (Km ⁻¹)
E	444	0.0063	0.0094
F	534	0.0067	0.0094
E + F	978	0.0065	0.0094

Tabel 2

Modelberekeningen voor pluimpenetratie in een inversie met sterkte $\Delta\theta_i$ voor de 3 neutrale stabiliteitsklassen D_1 , D_2 en D_3 van het Nationale model. Verder zijn U_{10} en U_{150} de windsnelheden op 10 en 150 m hoogte en Q_H de warmte-emissie. De pluimstijging Δh wordt gegeven door (3) en (4) met $c_1 = 115$. Tevens zijn de fracties f gegeven die in de menglaag blijven bij verschillende combinaties van criteria: f_1 volgens (12); f_2 volgens huidig Nationaal model, f_3 volgens Nationaal model met Δh gegeven door (3); f_4 volgens (15) met Δh volgens (3); f_5 volgens (15) met Δh volgens (4); f_6 volgens voorstel in [8].

klasse	U_{10}	U_{150}	Q_H	$\Delta\theta_i$	$\Delta h(3)$	$\Delta h(4)$	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
	(ms^{-1})	(ms^{-1})	MW	(K)	(m)	(m)						
D_1	1.45	2.24	67	2	769	357	1	1	0	0	0.48	0
	"	"	67	5	769	357	1	1	0	0	0.48	0
	"	"	100	2	1012	407	1	1	0	0	0.36	0
	"	"	100	5	1012	407	1	1	0	0	0.36	0
D_2	4.0	6.17	67	2	289	255	1	1	1	0.7	0.87	1
	"	"	67	5	289	255	1	1	1	0.7	0.87	1
	"	"	100	2	367	291	1	1	1	0.45	0.53	0
	"	"	100	5	367	291	1	1	1	0.45	0.53	0
D_3	8.0	12.34	67	2	144	202	1	1	1	1	1	1
	"	"	67	5	144	202	1	1	1	1	1	1
	"	"	100	2	184	230	1	1	1	1	1	1
	"	"	100	5	184	230	1	1	1	1	1	1

Tabel 3

Berekeningen van pluimstijging (Δh) en f-factor voor elke stabiliteitsklasse van het Nationale model [16]. Dit wordt gedaan voor zowel het oude model en het model met de voorgestelde veranderingen (nieuwe model).

Pasquill klasse	Δh		f	
	oud	nieuw	oud	nieuw
A ₁	377	938	1	1
A ₂	269	340	1	1
B ₁	377	938	1	1
B ₂	269	340	1	1
C ₁	357	797	1	1
C ₂	255	289	1	1
C ₃	144	144	1	1
D ₁	357	797	1	1
D ₂	255	289	1	1
D ₃	144	144	1	1
E ₁	315	178	0	0
E ₂	198	127	0	0
F ₁	315	178	0	0
F ₂	198	127	0	0

Tabel 4

Berekeningen van de jaargemiddelde concentraties in 3 receptorpunten voor de drie modelversies van de figuren 1 t/m 3. Hierbij is σ_z SS de σ_z volgens Singer en Smith en σ_z PA de σ_z volgens Pasquill. Voor de lokatie van de receptorpunten geldt:

a: $r = 4.1$ km, $\phi = 14^\circ$,

b: $r = 10.6$ km, $\phi = 45^\circ$,

c: $r = 35.4$ km, $\phi = 45^\circ$.

Hierbij is r de afstand en ϕ de bron-receptorrichting ten opzichte van het noorden. De gemiddelde concentraties zijn in $\mu\text{g m}^{-3}$.

Model	Receptorpunt		
	a	b	c
Oud (met σ_z SS)	8.9	4.5	1.4
Oud (met σ_z PA)	1.3	3.0	1.4
Nieuw	0.9	3.1	1.5

Tabel 5

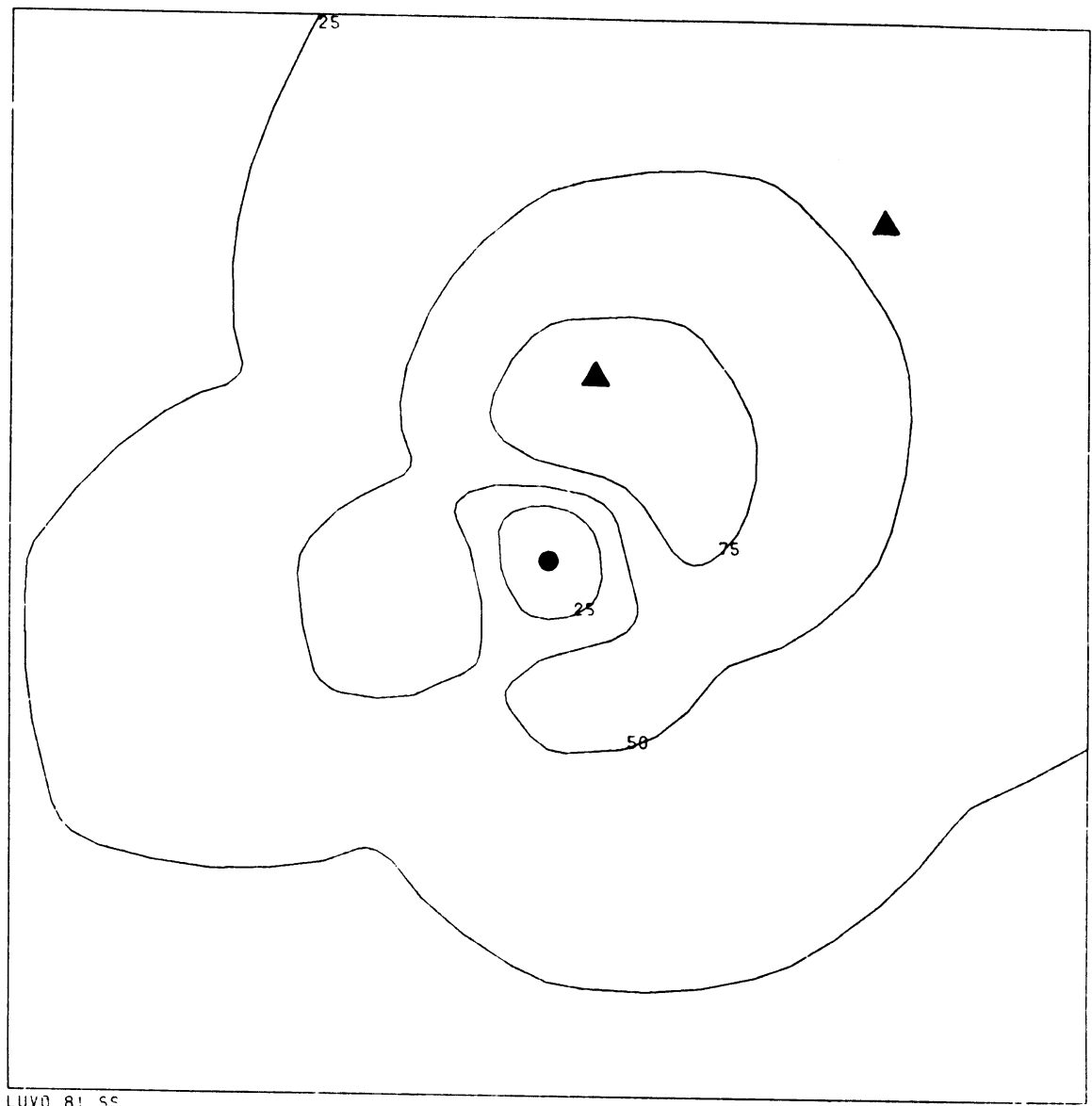
Berekeningen van het 95-percentiel in de 3 receptorpunten van tabel 4 voor drie modelversies. σ_y SS is σ_y volgens Singer en Smith, σ_y PA is σ_y volgens Pasquill.

Model	Receptorpunt		
	a	b	c
Oud (met σ_y SS)	59.7	28.3	8.2
Nieuw met σ_y SS	6.0	19.3	9.0
Nieuw met σ_y PA	5.6	20.3	10.2

Tabel 6

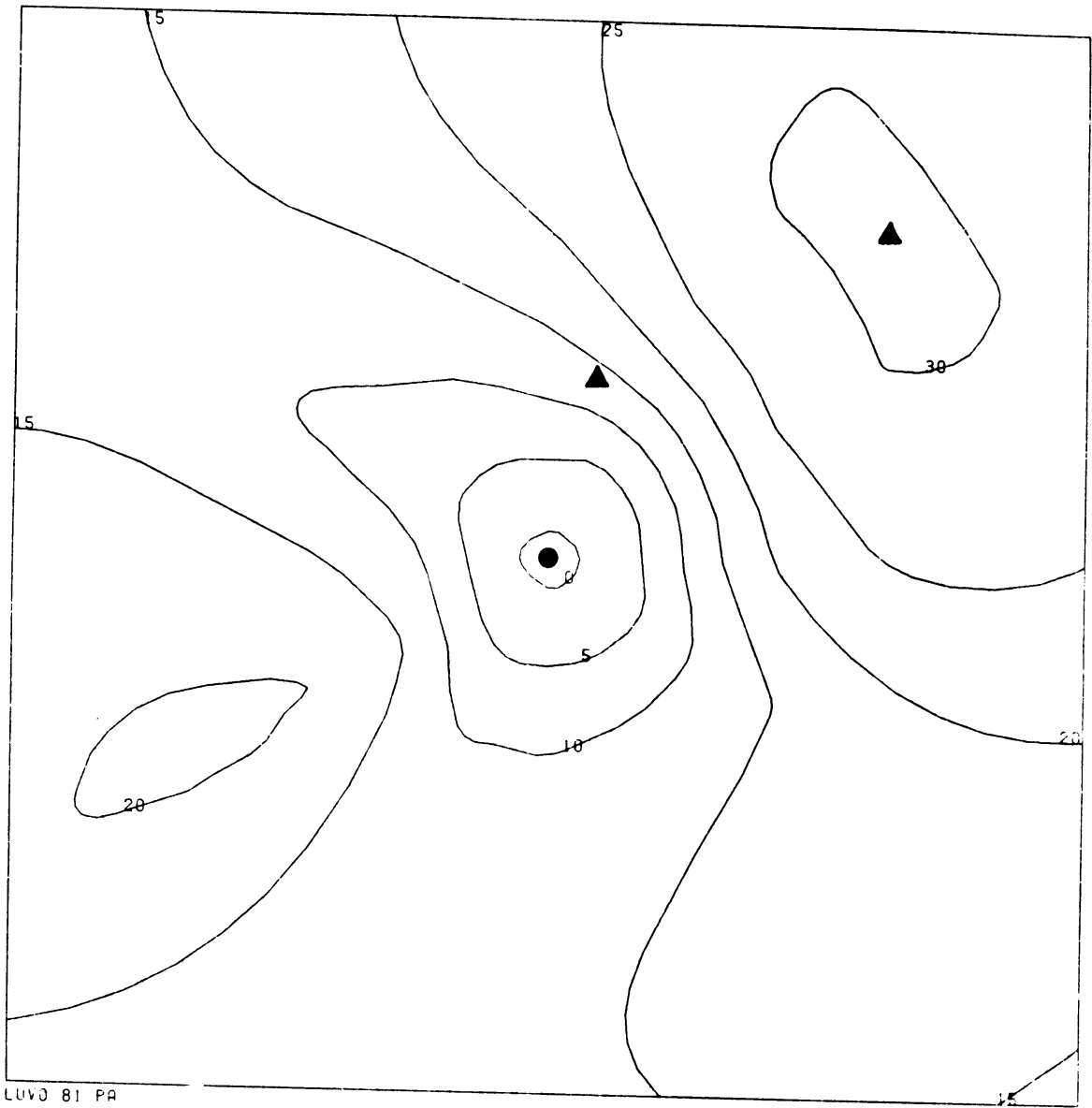
Als tabel 5 maar nu voor het 98-percentiel.

Model	Receptorpunt		
	a	b	c
Oud (met σ_y SS)	126.0	68.5	22.4
Nieuw met σ_y SS	13.1	48.4	24.3
Nieuw met σ_y PA	9.2	35.3	18.6

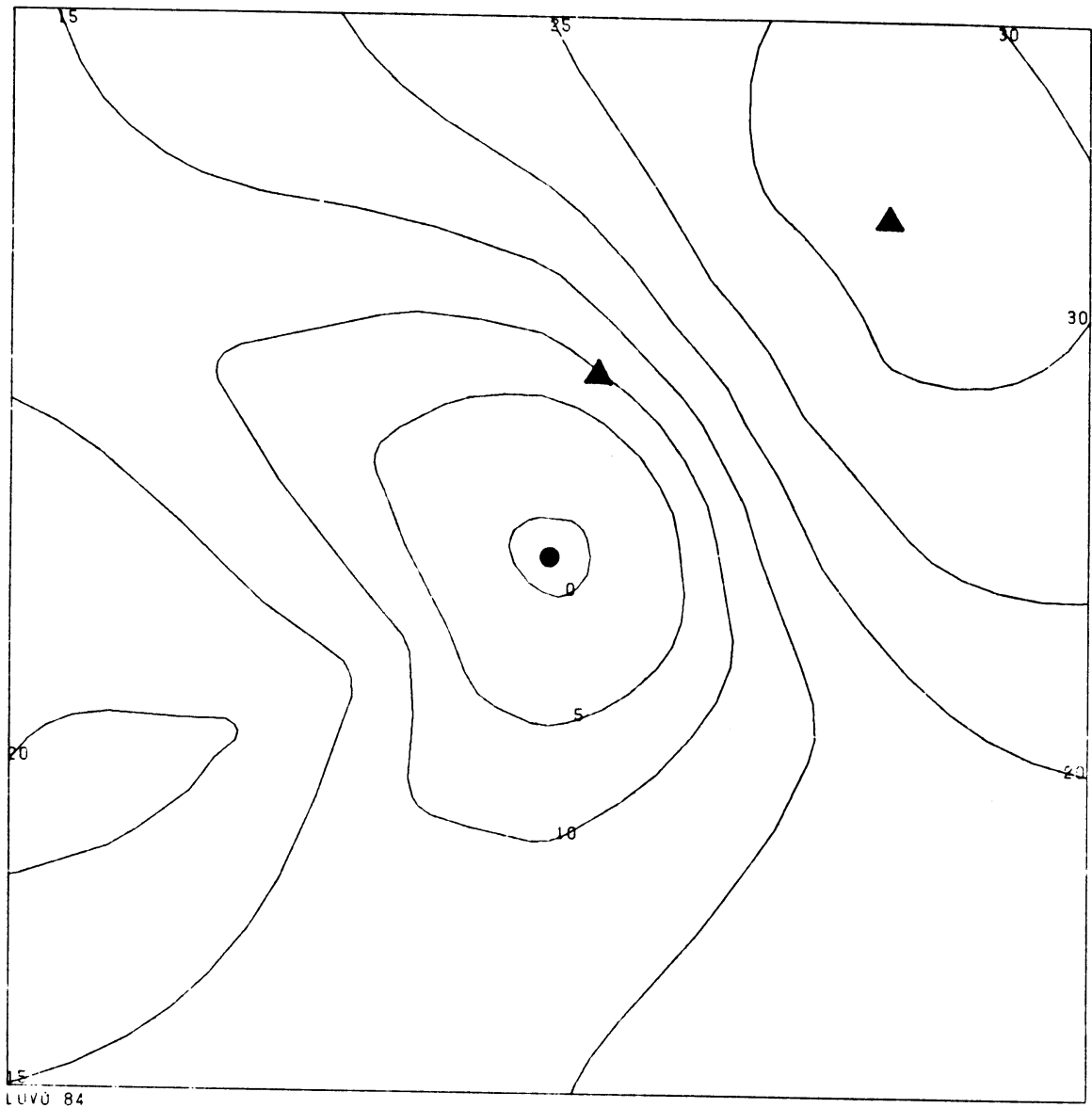


LUV0 81 55

Figuur 1 Het jaargemiddelde concentratiepatroon rondom de hoge puntbron van de paragrafen 6 en 8. Dit patroon is berekend met het Nationale model volgens [16] in een vierkant van 24 x 24 km rondom de bron. De bron is aangegeven met een stip. De receptorpunten a en b van de tabellen 5 t/m 8 zijn aangegeven met een driehoekje. De eenheid van de concentraties is in $0.1 \mu\text{g m}^{-3}$.



Figuur 2 Als figuur 1 maar nu met de verticale coëfficiënten volgens Pasquill.



Figuur 3 Als figuur 1 maar nu met de voorgestelde wijzigingen van paragraaf 7 (Nieuwe model).