

**Project Revisie Nationaal Model**

**Deelrapport IV**

# **Beschrijving rekenmodule voor de invloed van een gebouw op de verspreiding van een rookpluim**

*In opdracht van Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer*

*Rapporteurs: R.D.A. Scholten, J.J. Erbrink en A. van Melle, KEMA Sustainable*



## Samenvatting

Dit rapport beschrijft een rekenmodule om concentraties te berekenen in rookpluimen die beïnvloed worden door gebouwen. Het betreft beïnvloeding door een vrijstaand gebouw. Deze module is beschikbaar als een Fortran-programma, dat in een gaussisch verspreidingsmodel (zoals het Nationaal Model) kan worden aangeroepen. Dit rapport is een toelichting op de eerder geschreven gebruikershandleiding. Er wordt duidelijk gemaakt welke processen er in de module worden geformuleerd.

De module bestaat uit beschrijvende (semi-empirische) vergelijkingen die gebaseerd zijn op natuurkundige overwegingen, gefit op windtunnelmetingen van diverse oorsprong. In de module wordt de stroming van de wind over een gebouw beschreven met een dakwervel, een lijwervel en een stroming daaroverheen.

De lengte en hoogte van de wervels worden berekend als functie van hoogte, breedte en lengte van het gebouw en als functie van de windrichting en windsnelheid. Daarbij worden tevens de dimensies van de dakwervel berekend.

De banen van de stroomlijnen boven het gebouw worden uiteindelijk beschreven met een rekenmethode die de lijnen geleidelijk laat overgaan naar horizontale rechte stroomlijnen, rekening houdend met de hoogte van de lijn. Verder worden de impulsstijging en de pluimstijging door warmte-inhoud van de rookpluim en de schoorsteen down-wash berekend en verdisconteerd. Met deze pluimstijgingen en de stroomlijnen wordt de baan van de rookpluim berekend.

Uit de onderlinge afstanden tussen de pluim en de laagst mogelijke stroomlijn worden de volgende aspecten berekend:

- de hoogte en breedte van de pluim op diverse plaatsen
- de eventuele fractie van de emissie die naar de lijwervel gaat
- de hoogte en breedte van de "aparte" pluim uit de lijwervel
- de concentratie in de lijwervel (als gevolg van de opgenomen pluimfractie en de verversing door turbulente uitwisseling met wind die over de lijwervel waait)
- de concentratie in dat deel van de pluim dat over de lijwervel heen waait (rekening houdend met die eventuele pluimfractie die in de lijwervel terecht komt)
- de concentratie in de pluim uit de even hoge vrije schoorsteen.

Dit rapport over de rekenmodule geeft een kwalitatieve beschrijving van alle gemodelleerde processen en een zeer gedetailleerde beschrijving van de belangrijkste onderdelen.



## Lijst met gebruikte symbolen en constanten

De namen van de verschillende variabelen komen uit het computerprogramma van de rekenmodule en zijn zo functioneel mogelijk gekozen. Variabelen eindigend op H zijn genormeerd op de gebouwhoogte.

AFPRODI	afstand van de pijp tot rekenpunt/inwendige schoorsteendiameter
ALOEZIIIMAXH	plaats van ZIIIMAX ten opzichte van de loefwand/hoogte gebouw
ALM	identiek aan ALOEZIIIMAXH
ALOSLYWERLENGH	lijwervellengte bij losstaande dakwervel en loodrechte aanstroming
ALW	identiek aan ALOSLYWERLENGH
ALYAANH	lijwervellengte bij aanliggende dakwervel
ALYCOSH	afstand begin cosinuslijn ten opzichte van de lijwand/hoogte gebouw
ALYLYWERLENGH	lijwervellengte vanaf de lijwand bij losstaande dakwervel
ALYWLYH	lijwervellengte gebouw van de lijwand/hoogte gebouw
ALYW0LYH	begin van de lijwervel met criterium
ALYZOGH	afstand lijzogwervel/hoogte van het gebouw
B	breedte loefwand ten opzichte van wind (m)
BPROH	projectie van het gebouw voor elke keuze van loefwand/hoogte van het gebouw
BPROHSCHEEF	om correcties met BPROH te corrigeren voor scheve wind aanstroming
CONLY	concentratie in de lijwervel
$C_D$	drag coëfficiënt
$C_{p \text{ rook}}$	soortelijke warmte van rook ( $10^3 \text{ J/kg}$ )
DAKWERVELLENGH	dakwervellengte
$D_{\text{inw}}$	inwendige diameter van de schoorsteen
$D_{\text{uitw}}$	uitwendige diameter van de schoorsteen
DWL	dakwervellengte (m)
DWLs	dakwervellengte voor scheve aanstroming (m)
FRBRONLY	fractie van de pluim in de lijwervel
$FR_{\text{inly}}$	fractie van de pluimmassa in lijwervel
$FR_{\text{vrij}}$	fractie van de pluimmassa boven de lijwervel (vrije pluim)
$FR_{\text{jet}}$	fractie van pluim dat via de jet in de lijwervel komt
H	hoogte gebouw (m)
HGEM3D4ZIIH	hoogte gemiddelde scheidingsstroomlijn op 3/4 lijwervel
HLYCOSH	hoogte begin cosinuslijn/hoogte van het gebouw
HLYZOGH	hoogte stroomlijn achter het zog
HPLUIM3D4LYH	pluimhoogte/gebouwhoogte op 3/4 van de lijwervel
HPRODI	hoogte gebouw/inwendige schoorsteendiameter
HSSLY3D4H	hoogte scheidingsstroomlijn
HWINRAD	hoek tussen windrichting en de lange gebouwzijde (rad)
HWINORM	hoek tussen windrichting en de lange gebouwzijde (grd)

HZIIIMAXH	maximale hoogte lijwervel
L	lengte gebouw (m)
$Q_h$	warmte-output van de pluim (MW)
$Q_{\text{emissie}}$	emissie van de bron (kg/s)
REYNOLDS	Reynolds-getal
STP	identiek aan STRYKPLUIMH
STRYKPLUIMH	windstrijklengte van de pluim over het dak/hoogte van het gebouw
SYW3D4	$\sigma_y$ wervel op 3/4 afstand van de lijwervel
T	temperatuur omgevingslucht (hier op 15°C gesteld)
$T_L$	Lagrangiaanse tijdschaalwaarde
$u_{10}$	windsnelheid op 10 m hoogte
$u_{\text{pluim}}$	windsnelheid op pluimhoogte (m/s)
$u_{\text{ombuig}}$	windsnelheid op hoogte van het ombuigen van de pluim na de impuls-stijging
$u_{\text{pijp}}$	windsnelheid op pijpmondhoogte
$u^*$	wrijvingsnelheid
UPYP3DU	windsnelheid op pijp + (3* uitwendige schoorsteendiameter) hoogte
VERSOPPHH	verversingsoppervlak
$v_{\text{uit}}$	uittreesnelheid van de pluim
WPROU	combinatie windsnelheid en windhoek op pijphoogte
WCON	cosinus van de windhoek bij de pijptop
XMAX	afstand waarop de eindstijging plaatsvindt
z	meethoogte
$z_0$	ruwheidslengte
ZIILYH	hoogte stroomlijn
ZIIH3D4	hoogte turbulentie en niet-turbulentie grens
ZYWAND	diepte van het gebouw (m)
$\delta_h$	stack-tip down-wash
$\Delta_h$	pluimstijging
$\kappa$	Von Karman constante (0,41)
$\nu_{\text{lucht}}$	kinematische viscositeit lucht ( $18,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )
$\rho_{\text{lucht}}$	soortelijke dichtheid van lucht ( $1,293 \text{ kg}/\text{m}^3$ )
$\rho_{\text{rook}}$	soortelijke dichtheid van rook ( $1,293 \text{ kg}/\text{m}^3$ )
$\sigma_{y0}$	begin pluimbreedte na impulsstijging
$\sigma_{yw0}$	initiële horizontale pluimbreedte van lijwervel (m)
$\sigma_{y00}$	pluimbreedte ten gevolge van de schoorsteen down-wash
$\sigma_{z0}$	begin pluimhoogte na impulsstijging
$\sigma_{zw0}$	initiële verticale pluimbreedte van lijwervel)
$\sigma_{z00}$	pluimhoogte ten gevolge van de schoorsteen down-wash
$\Pi$	$\pi$ (= 3.1415926536)

# 1. Inleiding

In de oude situatie is duidelijk gesteld dat de geldigheid van het Nationaal Model (NM) zich beperkt tot vlak of ruw terrein; de toepassing binnen stedelijk gebied is beperkt tot situaties waarin slechts één blokvormig gebouw de pluimverspreiding verstoort. Verder gelden voor het NM ten aanzien van de verspreiding rond een gebouw de volgende restricties:

- min of meer kubusvormige gebouwen
- welke als enige het emissiepunt beïnvloeden (niet geschikt voor meerdere gebouwen)
- plaatsing van het emissiepunt op het midden van het (platte) dak
- afstanden groter dan ruwweg 100 m; er worden geen “lijwervel” concentraties aanbevolen (hoewel deze wel in de beschrijving opgenomen zijn).

Om deze redenen is er ten behoeve van het Nieuwe Nationaal Model een rekenmodule ontwikkeld die deze restricties niet meer heeft.

De doelstellingen voor de ontwikkeling van de nieuwe verspreidingsmodule zijn nog even kort samengevat:

- maak een model voor de berekening van grondconcentraties onder een pluim uit een schoorsteen op, voor, naast of achter een gebouw van willekeurige verhoudingen, mits rechthoekig
- niet alleen loodrechte aanstroming, maar ook aanstromingen onder verschillende hoeken
- de emissie heeft een beginsnelheid waardoor ze opstijgt (impulsstijging) en/of een stijging ten gevolge van de warmte-inhoud (buoyancy). De soortelijke massa van de afgassen is ongeveer gelijk aan die van de lucht in de omgeving
- concentraties op korte afstand (< 100 m) van een gebouw moeten er mee berekend kunnen worden
- test en fit de module op een veelheid van beschikbare windexperimenten.

De in dit rapport toegelichte rekenmodule voorziet in de volgende situaties:

- het gebouw kan hoog (torenflat-vorm), maar ook breed of smal zijn; kortom van schutting tot naald. Ook relatief lange gebouwen (in de lengterichting van de wind) zijn toegestaan
- de pijp kan op het dak staan, maar ook voor, achter of naast het gebouw
- de uitmonding van de pijp kan lager dan het gebouw zijn
- de hoek die de wind maakt ten opzichte van het gebouw mag willekeurig ingevuld worden
- de “lijwervel” concentraties worden eveneens berekend
- concentraties op zeer korte afstand (< 100 m) van een gebouw zijn hiermee te berekenen.

In dit rapport wordt in hoofdstuk 2 de dakwervel, lijwervel en de stroomlijnen besproken. Vervolgens in hoofdstuk 3 de verticale invloeden en daarna de pluimfractie over wervel en vrije atmosfeer in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 de toename van de pluimdimensies door gebouweffect en in hoofdstuk 6 de concentraties in de lijwervel en de pluim. In hoofdstuk 7 komt het toepas-singsgebied aan de orde en vervolgens de software-beschrijving. Daarna in hoofdstuk 9 de metingen en de vergelijking metingen en berekeningen in hoofdstuk 10. Hoofdstuk 11 geeft

de vergelijkende berekeningen met de methode uit 1986 en tot slot de afstandsafhankelijkheid van het gebouweffect in hoofdstuk 12. Als laatste in hoofdstuk 13 de discussies.



## 2. Methodebeschrijving

In het project Benchmark PC-Stacks en Pluimplus is op de eerste vergadering van het deskundigencomité afgesproken een sluitende beschrijving van **de inbouw** van de gebouwroutine te geven. Deze nieuwe gebouwmodule is indertijd ontwikkeld in opdracht van VROM en in het project Revisie Nationaal Model (door TNO uitgevoerd in opdracht van VROM, in nauwe samenwerking met KEMA) toegevoegd aan het consensusmodel. De gebouwmodule kan toegepast worden als een black-box in een willekeurig gaussisch pluimmodel.

De rekenmodule over de invloed van een gebouw sluit aan bij de gebruikelijke vrije pluim berekening met het gaussisch pluimmodel, maar de hoogte en de dispersiecoëfficiënten  $\sigma_y$  en  $\sigma_z$  worden voor de gebouwinvloed gecorrigeerd. Er wordt een eventuele pluim uit de lijwervel toegevoegd en de concentratie in de lijwervel wordt op unieke (niet gaussische) wijze berekend.

De empirische vergelijkingen in het model zijn gebaseerd op metingen in windtunnels van concentraties, stroomlijnposities en hoogte van de pluim. Er zijn waarnemingen, foto's en video's van rookpluimen op of achter gebouwen gebruikt.

Nieuw in deze rekenmodule is dat de dispersie van een pluim zonder gebouw wordt beschreven door de Taylor-dispersievergelijking (Taylor, 1921) als functie van de turbulentie en de Lagrange tijdschaal. Na toetsing aan gedane windtunnelproeven blijkt dit betere resultaten op te leveren dan de gebruikelijke beschrijving. Daarbij komt dat deze nieuwe methode beter aansluit bij het verspreidingsmodel STACKS (Erbrink, 1995) en het Nieuwe Nationaal Model.

De concentratie wordt beschreven met de gaussverdeling (pluimashoogte, dispersiecoëfficiënten  $\sigma_z$  en  $\sigma_y$ , reflectie aan de bodem).

Eveneens nieuw in deze rekenmodule is dat de stroming rond een gebouw wordt gestileerd door drie aparte gebieden:

- een dakwervel als begrensde ruimte
- een lijwervel als begrensde ruimte
- de stroming over deze wervels heen.

De module geeft in een aantal gevallen *twee* pluimfracties terug met elk hun eigen (start)dimensies en bronsterkte. Deze betreffen de pluimfractie in de doorgaande pluim en de pluimfractie die in de lijwervel wordt opgenomen. De bronhoogte van deze laatste fractie is dus gelijk aan de wervel-hoogte, zoals deze door de module teruggegeven wordt. De verspreiding van deze twee afzonderlijke bronstermen dient in het hoofdprogramma voortgezet te worden. De module berekent alleen concentraties indien het gevraagde roosterpunt zich in de lijwervel bevindt. Indien het roosterpunt zich niet in de lijwervel bevindt (dit zijn vrijwel alle roosterpunten in een gebruikelijke berekeningssituatie), dan worden de *gecorrigeerde* pluimparameters (dispersie, pluimhoogte en eventueel concentraties) als uitvoer teruggegeven. Deze

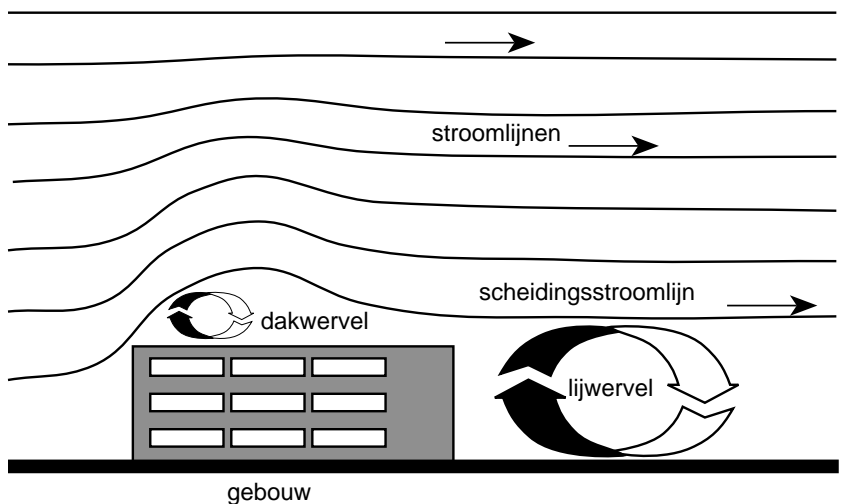
gecorrigeerde pluimparameters worden in de formule voor de gaussische pluim ingevuld, waarna de concentraties op de gridpunten normaal berekend kunnen worden.

## 2.1 De dakwervel

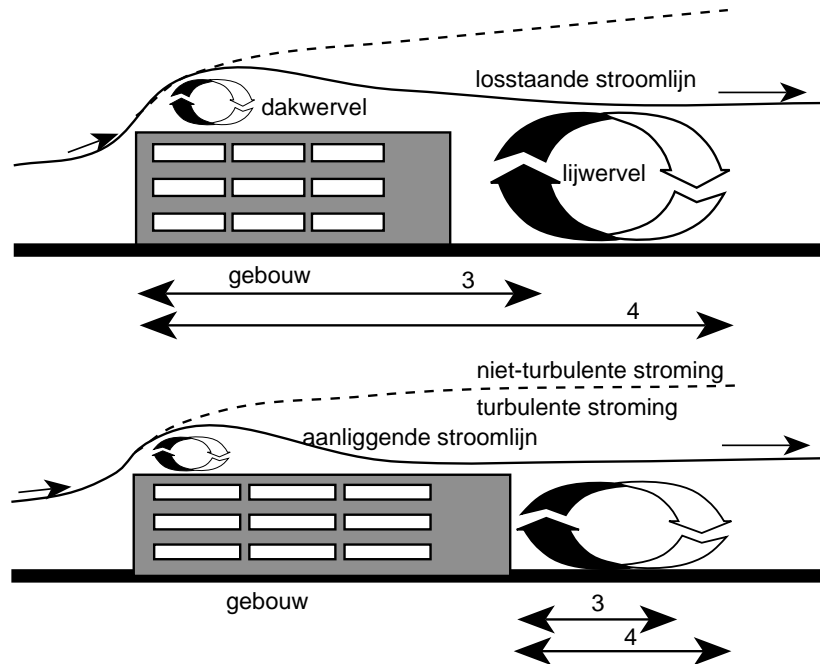
De gegevens van de dakwervel zijn ontleend aan onderzoek van (Wilson, 1979) aan lange gebouwen in een watertunnel. In zijn metingen is de dakwervel altijd korter dan het dak. Hierbij zijn de hoogte en lengte van de dakwervel gemeten. Behalve de dakwervel is de grens van het sterk-turbulente gebied (stroomlijn) gemeten (ZII) en de grens van het zog (ZIII) daarboven.

In deze rekenmodule is een nieuwe correlatievergelijking gemaakt van Wilson's metingen omdat zijn tweedelige vergelijking in de uiterste gevallen van zeer slanke of zeer brede gebouwen niet juist is. De aangepaste vergelijking bestrijkt het gehele gebied.

Nieuw ten opzichte van andere modellen is dat rekening gehouden wordt met het aanliggend of losstaand zijn van de stroming achter de dakwervel. Als criterium voor aanliggen of los staan is genomen dat de stroming aanligt aan het dak (re-attachment) als de berekende dakwervel korter is dan het dak. Als de berekende dakwervel langer is dan tweemaal het dak, blijft de stroomlijn los staan. Dan is er een gemeenschappelijke stroming in de lijwervel en de dakwervel (zie Figuur 1 en Figuur 2). In de tussengelegen gevallen wordt er lineair geïnterpoleerd, aangezien de stroming dan instabiel is. Ook de plaats van het beginpunt van de scheidingsstroomlijn wordt gemiddeld.



Figuur 1 Stroming rond een gebouw



Figuur 2 Voorbeeld van vrijstaande (2a) en aanliggende (2b) stroomlijn boven het dak (de streeplijn is de zogelijn: de scheidingslijn tussen turbulente en niet-beïnvloede stroming)

De correlatievergelijking voor de dakwervel is ook toegepast op gebouwen die korter zijn dan de dakwervel, wat een onderschatting van de hoogte van de lijwervel kan opleveren. Het is te overwegen om in dat geval een andere vergelijking toe te passen, die volgt uit metingen van lijwervels achter brede korte gebouwen.

Voor de berekening van de verschillende dakwerveldimensies wordt eerst de veelgebruikte projectie van de zijwand van het gebouw voor elke keuze van de loefwand (BPROH) bepaald:

$$BPROH = \frac{B \cdot \cos(HWINRAD) + ZYWAND \cdot \text{ABS}(\sin(HWINRAD))}{H}$$

Bij een rechte aanstroming van de wind is de dakwervellengte (DAKWERVELENGH):

$$DAKWERVELENGH = \frac{2.1 \cdot BPROH}{1.5 + BPROH}$$

Het meest voorkomend is echter een scheve aanstroming. Hierbij is de dakwervellengte (DWLs = DAKWERVELENGH voor scheve aanstroming):

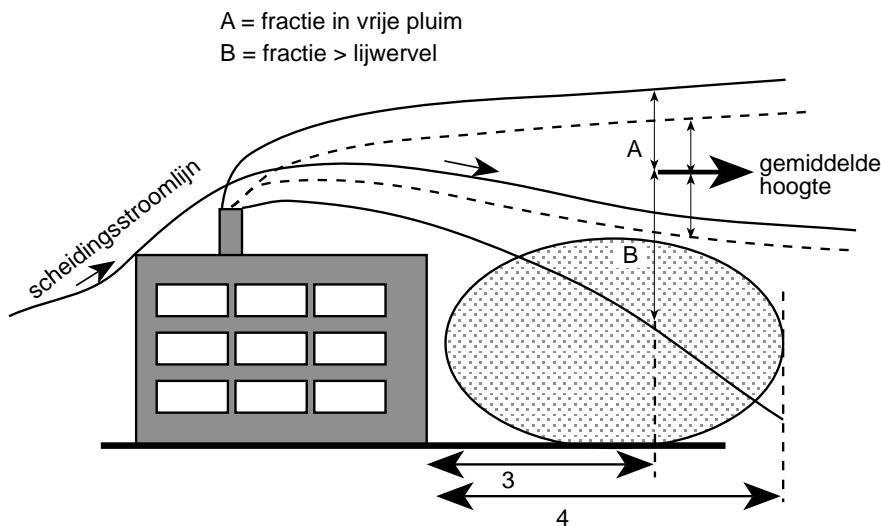
$$DWL_s = \frac{DWL \cdot [1 - 0.9 \cdot \min(\min(\text{ABS}(HWINORM), 90 - \text{ABS}(HWINORM)), 20)]}{20}$$

De verticale afmeting van de dakwervel wordt bepaald door de hoogte van de stroomlijn die uiteindelijk ook boven de lijwervel terecht komt (ZIILYH). Deze is van groot belang om de stromingstoestand op het dak te kenschetsen.

$$ZIILYH = \max[1 + 0.22275 \cdot (1.1) \cdot DWL + 0.1 \cdot (0.5 \cdot DWL - STRYKPLUIMH), 1]$$

## 2.2 De lijwervel

De lijwervel is afhankelijk van de gebouwafmetingen. Verder is het hoogteverschil tussen scheidingsstroomlijn, ZIII en gebouwhoogte hierbij van belang. De lengte van de lijwervel wordt uitgerekend voor zowel een kort dak vanaf de voorzijde van het gebouw (loefzijde) als voor een lang dak vanaf de achterzijde van het gebouw (lijzijde). Zie Figuur 2 en Figuur 3.



Figuur 3 Fracties van een pluim en een lijwervel rond een gebouw

De lijwervellengte bij losstaande dakwervel en loodrechte aanstroming (ALW = ALOSLY-WERLENGH) is:

$$ALW = \frac{3.5 \cdot BPROH}{1 + 0.4 \cdot BPROH}$$

De lijwervellengte bij losstaande dakwervel vanaf de lijwand is:

$$ALYLYWERLENGH = ALW - STRYKPLUIMH$$

Bij aanliggende dakwervel is de lijwervellengte (ALYAANH):

$$ALYAANH = \frac{BPROH}{1 + \frac{1}{6} \cdot BPROH}$$

De maximale hoogte van de lijwervel (HZIIMAXH) wordt als volgt berekend:

$$HZIIMAXH = 1 + 0.28 \cdot ALOEZIIMAXH^{0.3333} \cdot 1.1 \cdot DWL^{0.6667}$$

hierin is de afstand van de maximale hoogte van de lijwervel (genormeerd op H) ten opzichte van de loefwand voor gemiddeld losstaande en aanliggende dakwervel (ALM = ALOEZIIMAXH):

$$ALM = 0.25 \cdot ALW + (-0.25 \cdot ALW + 0.5 \cdot 1.1 \cdot DWL) \cdot \max\left(0, \min\left(1, \frac{STRYKPLUIMH - DWL}{DWL}\right)\right)$$

## 2.3 De stroomlijnen

In deze rekenmodule wordt de hoogte van de scheidingsstroomlijn boven de dak- en lijwervel en het zog berekend, nadat de afmetingen van die wervels en het zog zijn uitgerekend. Als de emissie zonder impuls vrijkomt op de scheidingsstroomlijn, zal de pluim de scheidingsstroomlijn volgen. Deze baan kan getoetst worden aan metingen van emissies die vrijwel op de scheidingsstroomlijn beginnen. Dat zijn emissies die op dakhogte beginnen, of die een jetstijging mee-maken.

De diffuse, denkbeeldige scheiding tussen het gebied van recirculatie en het gebied met de doorgaande stroming wordt voorts de scheidingsstroomlijn genoemd. De gedachte is dat een deeltje op die lijn evenveel kans heeft om in de continue stroming als in de recirculerende stroming te komen. De scheidingsstroomlijn is de laagst mogelijke stroomlijn (s). De stroomlijnen daarboven zijn gaandeweg minder gekromd, om op grotere hoogte over te gaan in horizontale lijnen.

De hoogte van de scheidingsstroomlijn en van ZIII (de grens van het zog) boven de lijwervel vormen het criterium in het model voor de extra dispersie ( $\sigma_z$ -extra) en de fractie die naar de lijwervel gaat.

De scheidingsstroomlijn boven het gebouw wordt berekend volgens correlaties op basis van metingen uit de literatuur. De restrictie is dat ze gelden in het midden van het dak. Ruimer genomen gelden de resultaten ook nog tot een afstand H (= gebouwhoogte) vanaf de zijkanten.

De scheidingsstroomlijn wordt in vier gedeelten berekend en wel voor een aanliggende of een losstaande dakwervel apart. De lengte van het zog wordt berekend met de aanname dat deze 4 maal zo lang is als de lijwervel; voor een losstaande dakwervel gemeten vanaf de top van de lijwervel en voor een aanliggende dakwervel gemeten vanaf de “verlengde” lijwand. De schei-

dingsstroomlijn vanaf de lijwervel tot het einde van het zog wordt berekend onder de aanname dat het verloop ertussen de vorm van een cosinus heeft.

De hoogte van de stroomlijn achter het zog (HLYZOGH) wordt als volgt bepaald:

$$HLYZOGH = \frac{HZIIMAXH \cdot 0.5}{0.51 + BPROH} + \max\left(0, \min\left(1, \frac{STP - DWL}{DWL} \cdot \left[\frac{HLYCOSH \cdot 0.5}{0.51 + BPROH} - \frac{HZIIMAXH \cdot 0.5}{0.51 + BPROH}\right]\right)\right)$$

Hierin is STP = STRYKPLUIMH en:

$$HLYCOSH = HZIIMAXH$$

of als blijkt dat de maximum hoogte van de stroomlijn boven het dak ligt:

$$HLYCOSH = \max(ZIIMAXH + 0.1(ALOEZIIMAXH - STRYKPLUIMH), 1)$$

De grens tussen pluim en lijwervel wordt bepaald door de gemiddelde hoogte tussen turbulentiengrens en scheidingsstroomlijn op 3/4 afstand van de lijwervel (HGEM3D4ZIIH):

$$HGEM3D4ZIIH = (ZIIH3D4 + HSSLY3D4H) \cdot 0.5$$

hierin is de hoogte van de turbulentiengrens (ZIIH3D4):

$$ZIIH3D4 = 1 + 0.28 \cdot (TERM1 + STRYKPLUIMH)^{0.333} \cdot 1.1DAKWERVELENGH^{0.667}$$

Met als tussenterm TERM1:

$$TERM1 = 0.75 \cdot ALYWLYH + 0.25 \cdot ALYWOLYH$$

hierin is AVY = ALYLYWERLENGH en de lijwervellengte vanaf de lijwand gedeeld door de gebouwhoogte (ALYWLYH) is:

$$ALYWLYH = AYY + (-AYY + ALYAANH) \cdot \max\left(0, \min\left(1, \frac{STRYKPLUIMH - DWL}{DWL}\right)\right)$$

en de afstand van de loefwand tot aan het begin van de lijwervel (ALYW0LYH):

$$ALYWOLYH = -STRYKPLUIMH \cdot \left[1 - \max\left(0, \min\left(1, \frac{STRYKPLUIMH - DWL}{DWL}\right)\right)\right]$$

De andere term voor de bepaling van gemiddelde scheidingsstroomlijn op 3/4 afstand van de lijwervel (HGEM3D4ZIIH) is de hoogte van de scheidingsstroomlijn op 3/4 afstand van de lijwervel (HSSLY3D4H), deze is eveneens afhankelijk van TERM1:

als TERM1 < 0 dan is

$$HSSLY3D4H = \max(HZIIMAXH + 0.1 \cdot TERM1, 1)$$

als  $TERM1$  kleiner is dan de plaats van het begin van de cosinuslijn ten opzichte van de lijnwand voor gemiddeld aanliggende en losstaande dakwervel ( $ALYCOSH$ ) dan is:

$$HSSLY3D4H = TERM1$$

waarbij men moet bedenken dat  $ALYCOSH = 0$  als blijkt dat het maximum van de stroomlijn boven het dak ligt óf:

$$ALYCOSH = ALOEZIIMAXH - STRYKPLUIMH$$

Nu moet eerst de term  $ALYZOGH$  berekend worden; hierin is  $ALW = ALOSLYWERLENGH$ :

$$ALYZOGH = 4 \cdot ALW - STP + \max\left(0, \min\left(1, \frac{STP - DWL}{DWL}\right)\right) \cdot \left[ \frac{4 \cdot BPROH}{1 + \frac{1}{6} \cdot BPROH} - 4 \cdot ALW - STP \right]$$

Als  $TERM1 < ALYZOGH$  is dan:

$$HSSLY3D4H = TERM2$$

Vervolgens wordt  $TERM2$  berekend:

$$TERM2 = HLYZOGH + \left(1 + \cos\left(\frac{TERM1 - ALYCOSH}{ALYZOGH - ALYCOSH} \cdot \Pi\right)\right) \cdot 0.5 \cdot (HLYCOSH - HLYZOGH)$$

De formulering van de stroomlijnen zelf is een gecompliceerde zaak; het geven van alle formuleringen geeft geen extra inzicht. Om die reden zijn maar een beperkt aantal formules gegeven die zodanig zijn gekozen dat de uitkomsten van windtunnelexperimenten zo goed mogelijk worden beschreven voor allerlei typen gebouwen en stromingen.





### 3. Verticale invloeden

Verticale bewegingen van een pluim zijn afhankelijk van een aantal invloeden. Ten eerste zal de heersende meteorologie gekenmerkt door wind en turbulentie hierop invloed uitoefenen. Daarnaast kan de pluim direct achter een schoorsteen iets naar beneden verplaatst worden (schoorsteen down-wash). Verder zal de pluim door de uitreesnelheid al een verticale snelheid meekrijgen (impulsstijging). Door warmte inhoud zal de pluim ook nog eens een extra verticale snelheid krijgen (buoyancy).

#### 3.1 Wind en turbulentie

Voor het berekenen van de windsnelheid op een bepaalde hoogte  $z$  wordt gebruik gemaakt van het logaritmische windprofiel voor neutrale weersituaties:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)$$

Hierin is  $u^*$  de wrijvingsnelheid en  $\kappa$  de Von Karman constante.

Als ondergrens voor berekeningen op een bepaalde hoogte  $z$  wordt voor  $z$  de waarde  $0.5 + Z_0$  (ruwheidslengte) aangenomen. Onder de waarde  $Z_0$  hebben veel wind- en turbulentieberekeningen geen betekenis meer.

In de berekening voor de dispersieparameters  $\sigma_y$  en  $\sigma_z$  zijn parameters nodig voor de turbulentie-intensiteit en de tijdschaal van de turbulentie. Voor de turbulentie-intensiteit in verticale en horizontale richting ( $\sigma_w$  en  $\sigma_v$ ) worden waarden doorgegeven via de aanroep van de routines.

Voor de tijdschaalwaarde wordt een eenvoudig empirisch verband gebruikt:

$$T_l = \frac{300\sigma_w}{u_{10}}$$

#### 3.2 Down-wash

In de lijzijde van een schoorsteen of afgaskanaal kan een lijwervel ontstaan, die de rookpluim potentieel benedenwaarts trekt (down-wash). De mate van daling ( $\delta h/D_{uitw}$ ) hangt af van de windsnelheid op pijphoogte, de uitreesnelheid en de binnen- en buitendiameter van de schoorsteen:

$$\frac{\delta h}{D_{uitw}} = \frac{v_{uit} \cdot D_{inw} \cdot \sqrt{\left(\frac{\rho_{rook}}{\rho_{lucht}}\right)}}{D_{uitw} \cdot C_D \cdot u_{pijp}}$$

De waarde van  $C_D$  wordt bepaald door de waarde van het Reynolds-getal. Dit Reynolds-getal wordt als volgt berekend:

$$REYNOLDS = \frac{\rho_{lucht} \cdot u_{pijp} \cdot D_{uitw} \cdot WSCON}{\nu_{lucht}}$$

WSCON is hierin de cosinus van de windhoek omhooggericht bij de pijptop.

Als  $REYNOLDS < 200\ 000$ , zoals in een windtunnel, dan geldt voor  $C_D$ :

$$C_D = 1.2 + \frac{9.8}{REYNOLDS}$$

Als  $REYNOLDS > 200\ 000$ , zoals buiten, dan geldt  $C_D = 0.6$ .

De schoorsteen down-wash kan natuurlijk nooit meer bedragen dan de pijphoogte boven het maaiveld.

### 3.3 Impulsstijging

De stijging van de uitredestroom door impuls kan een belangrijke bijdrage leveren aan de effectieve pluimhoogte. De formulering van de impulsstijging hangt sterk af van de plaats van de uitrede-opening in de luchtstroom. In feite wordt daarmee rekening gehouden met het windsnelheidsprofiel van de overstromende lucht. Bepalend daarbij zijn in welk gebied van de stroming de pluim stijgt: turbulent of niet-turbulent, kalme lucht (zoals in delen van de lijwervel) of in lucht die de windsnelheid van de omgevingslucht heeft of in lucht die een hogere windsnelheid heeft.

Ook mede bepalend is of de rook in laminaire dan wel turbulente stroom terecht komt.

De rookdichtheid wordt als gemiddelde waarde van rook en van de omgevingslucht genomen. Indien de pijp voor het gebouw staat (en lager is dan de gebouwhoogte) dan wordt geen impulsstijging verondersteld.

In de luchtmassa van een wervel boven het dak kan de pluim vrij stijgen tot de hoogte van de scheidingsstroomlijn. In de lijwervel stijgt de pluim ook vrij tot de top van de lijwervel. In het traject van 3/4 van de afstand loefwand en lijwervellengte en tweemaal de lijwervellengte, stijgt de pluim beperkt tot de verbindingslijn tussen deze twee punten. Na deze afstand (tweemaal de lijwervel-lengte) stijgt de pluim niet meer vrij.

De afstand tot waarop de maximale pluimstijging ( $X_{MAX}$ ) plaatsvindt is nodig voor de berekening van de afstand tot waar het pluimstijgtraject zich voortzet. De stijgafstand is afhankelijk van de vraag of het impulsstijging betreft of stijging ten gevolge van de warmte-inhoud van de pluim.

Hiervoor wordt eerst de variabele  $WPROU$  uitgerekend:

$$WPROU = \frac{v_{uit} \cdot WSCON}{u_{pijp}}$$

Voor impulsstijging geldt dat de afstand waarop het einde van de stijging plaatsvindt is:

$$X_{MAX} = 4 \cdot D_{inw} \cdot \left( WPROU + 6 + \frac{9}{WPROU} \right)$$

Voor een warme rookpluim geldt indien de warmte-output ( $Q_h$ ) < 6 MW:

$$X_{MAX} = 190 \cdot Q_h^{0.63}$$

Voor een warme rookpluim geldt indien de warmte-output ( $Q_h$ ) > 6 MW:

$$X_{MAX} = 284 \cdot Q_h^{0.4}$$

### 3.4 Pluimbreedte

De pluimbreedte neemt toe bij down-wash. Daarbij worden twee gevallen onderscheiden:

- de pluim stijgt in kalme lucht (lage windsnelheid)
- de pluim stijgt en buigt om met de wind mee.

Voor een pluim in kalme lucht geldt:

$$\sigma_{z00} = \max(0.1 \cdot v_{uit} \cdot HPRODI, 0.46) \cdot \frac{v_{uit}}{u_{ombuig}} \cdot D_{inw}$$

Hierin is  $HPRODI = \text{hoogte gebouw} / D_{inw}$  en  $u_{ombuig}$  is de windsnelheid in het punt waarin de pluim ombuigt van verticaal naar horizontaal. In deze situatie is er dan geen down-wash achter de schoorsteenpijp.

Voor de horizontale uitbreiding van de pluim geldt:

$$\sigma_{y00} = \max(0.1 \cdot u_{uit} \cdot HPRODI, 0.46) \cdot D_{inw}$$

In het andere geval waarbij er wel een cross-wind is geldt:

$$\tau_{z00} = 0.46 \cdot \frac{v_{uit}}{u_{pijp}} \cdot (D_{inw} - \text{downwash hoogte})$$

en:

$$\sigma_{y00} = D_{inw} \cdot \max\left(0.46 \cdot \frac{v_{uit}}{u_{pijp}}, 0.35\right)$$

De afstand waarop het einde van de stijging plaatsvindt is:

$$XMAX = 4 \cdot D_{inw} \cdot \left(\frac{v_{uit}}{u_{pijp}} + 6 + \frac{9}{v_{uit}/u_{pijp}}\right)$$

### 3.5 Pluimstijging

De pluimstijging die berekend wordt voor warme pluimen hangt ook weer van de warmte-inhoud af. De bekende formule van Briggs wordt hierbij niet toegepast. Deze formule houdt namelijk geen rekening met het windshear effect: het toenemen van de windsnelheid met de hoogte. Dit is niet zo belangrijk voor grote schoorstenen omdat daar het windprofiel niet erg uitgesproken meer is. Maar voor lage bronnen is de toename van de windsnelheid in de oppervlaktelaag een factor van belang. Daarom wordt in het nieuwe Nationale Model geen formule voor de eindstijging toegepast, maar wordt de pluimstijging berekend over hoogtestapjes van 10 m.

Voor dit doel is het niet praktisch om een “incremental” model te gebruiken: het windprofiel rond een gebouw is immers niet goed deterministisch te beschrijven. Daarom worden ervaringsformules gebruikt voor situaties met stromingen rond een gebouw.

Alvorens de pluimstijging te berekenen worden eerst een paar variabelen bepaald:

UPYP3D = windsnelheid op pijp + (3 \* D<sub>uit</sub>) hoogte

AFPRODI = afstand van de pijp tot het rekenpunt/D<sub>inw</sub>

Verder geldt voor AFPRODI :

$$AFPRODI = \min\left(AFPRODI, \frac{XMAX}{D_{inw}}\right)$$

De uiteindelijke pluimstijging (D<sub>h</sub>) is dan:

$$\Delta h \cdot HPRODI = \left[ AFP^{0.75} \cdot \left( \frac{WPROU^2}{1 + 0.33 \cdot WPROU^2} + \frac{36.2 \cdot Q_h}{D_{inw} \cdot UPYP3DU^3} \right) \cdot AFP^2 + 0.84^3 \right]^{0.3}$$

Hierin is  $AFP = AFPRODI$ .

Tezamen met het effect van de stack-tip down-wash is de pluimstijging:

$$\Delta h_{final} = \Delta h + \delta h_{down-wash}$$

Na deze berekening wordt de pluimhoogte gecorrigeerd voor de hoogte van de stroomlijnen.



## 4. Verdeling van pluimfractie over wervel en vrije atmosfeer

Een belangrijk aspect betreft de gedeeltelijke opname van de pluim in de lijwervel. Dit bepaalt de bronterm voor een secundaire pluim die uit de lijwervel treedt en de bronterm voor de vrije pluim na gebouwinvloed. Dit proces vindt uiteraard alleen plaats indien de pluim over de lijwervel heen waait. Gedeeltelijke opname van de pluim in de wervel is niet alleen mogelijk doordat slechts een deel in de recirculatie wordt opgenomen door de neerwaartse stroming, maar ook doordat een deel van de pluim eenvoudig naast de wervel terecht kan komen bij scheve aanstroming.

Er zijn derhalve twee termen in de pluimfractieberekening:

$$FR_{inly} = FR_{verticaal} \cdot (1 - 2 \cdot FR_{horizontaal})$$

met als begrenzing dat de totale fractie altijd tussen 0 en 1 moet liggen.

De opname door verticale down-wash in de wervel vindt alleen plaats indien de pluimhoogte meer dan  $3 \cdot \sigma_z$  boven de lijwervel uitkomt. Anders is de pluimfractie in de wervel per definitie nul.

De pluimfractie naar de lijwervel  $FR_{horizontaal}$  is:

$$FR_{horizontaal} = 0.5 - 1.1111 \cdot G \cdot (1 + 1/4 \cdot G^3 - 0.8 \cdot G^{1.5})$$

met het getal G:

$$G = 0.35 \cdot \frac{0.5 \cdot BPROH}{\sigma_{y0} + \sigma_{y00}}$$

die gelden op een afstand van 3/4 tussen loefwand- en lijwerveleinde.

De pluimfractie naar de lijwervel  $FR_{verticaal}$  is:

$$FR_{verticaal} = 0.5 - 1.1111 \cdot G \cdot (1 + 1/4 \cdot G^3 - 0.8 \cdot G^{1.5})$$

met het getal G:

$$G = 0.35 \cdot \left( \frac{HPLUIM3D4LYH - HGEM3D4ZIIH}{(\sigma_{z0} - \sigma_{z00})/H} \right)$$

Hierin is  $HPLUIM3D4LYH$  = pluimhoogte/gebouwhoogte op 3/4 van de lijwervel en  $HGEM3D4ZIIH$  = hoogte gemiddelde scheidingsstroomlijn op 3/4 van de lijwervel (zie tevens paragraaf 2.3).

In deze formules stellen  $\sigma_{y0}$  en  $\sigma_{y00}$  de toename voor van de pluimbreedte ten gevolge van respectievelijk de lijwervel down-wash (deze wordt berekend op een afstand 3/4 van de loefwand - eind lijwervel) en de schoorsteen down-wash.  $\sigma_{z0}$  en  $\sigma_{z00}$  zijn dan de toename van de pluimhoogte ten gevolge van respectievelijk de lijwervel down-wash en de schoorsteen down-wash. Uiteindelijk is de fractie die in de vrije pluim blijft:

$$FR_{vrij} = I - FR_{inly}$$



## 5. Toename pluimdimensies door gebouweffect

Hierbij stellen  $\sigma_{y0}$  en  $\sigma_{z0}$  respectievelijk de horizontale en verticale extra pluimbreedte en -hoogte voor ten gevolge van de versterkte turbulentie van de stroming rond het gebouw.

Voor  $\sigma_{y0}$  geldt dat deze niet beïnvloed wordt door het gebouw. Wel kan er een extra bijdrage zijn door schoorsteen down-wash zoals al eerder is aangegeven.

De waarde  $\sigma_{z0}$  voor de vrije pluim hangt af van de plaats van de schoorsteen en de fractie van de pluim die beïnvloed wordt door de lijwervel. Deze fractie wordt berekend uit geometrische verhoudingen van de schoorsteenhoogte, lijwervelafmetingen en hoogte van de scheidingsstroomlijn. Voor de maximale toename van  $\sigma_{z0}$  geldt:

$$\sigma_{z0max} = H \cdot \max\left(1.48 - \frac{HPLUIM3D4LY}{HSSLY3D4H}, 0\right)$$

Hierin wordt HSSLY3D4H in paragraaf 2.3 besproken; H is de gebouwhoogte en HPLUIM3D4LY is de pluimhoogte op 3/4 afstand van de lijwervel.

De effectieve toename van  $\sigma_z$  is:

$$\sigma_{z0} = \sigma_{z0max} \cdot FR_{jet} \cdot FR_{inly}$$

Waarbij de twee fracties respectievelijk voorstellen welk deel van de pluim via de jet (uittreepotentieel) in de lijwervel komt (het andere deel steekt boven de scheidingsstroomlijn uit) en het deel dat feitelijk door de lijwervel beïnvloed wordt en dus extra turbulentie ervaart.

Voor de pluim die uit de lijwervel wordt losgelaten gelden andere formuleringen;  $\sigma_{z0}$  is:

$$\sigma_{zw0} = \left( HSSLY3D4H - \max\left(\frac{HSSLY3D4H}{2}, HSSLY3D4H - 0.5 \cdot BPROH\right) \right) \cdot H$$

De toename van de horizontale pluimdimensies was in de oude aanbeveling (1984) gelijk aan H/2.36. Deze nieuwe aanbeveling geeft een meer universele formule, geldig voor diverse verhoudingen van B/H. De oude aanbeveling was geldig voor B/H = 1. De nieuwe aanbeveling levert voor B/H = 1 op: H/2.38 en sluit dus goed aan bij de oude aanbeveling.

Indien BPROHSCHEEF < 12 dan geldt:

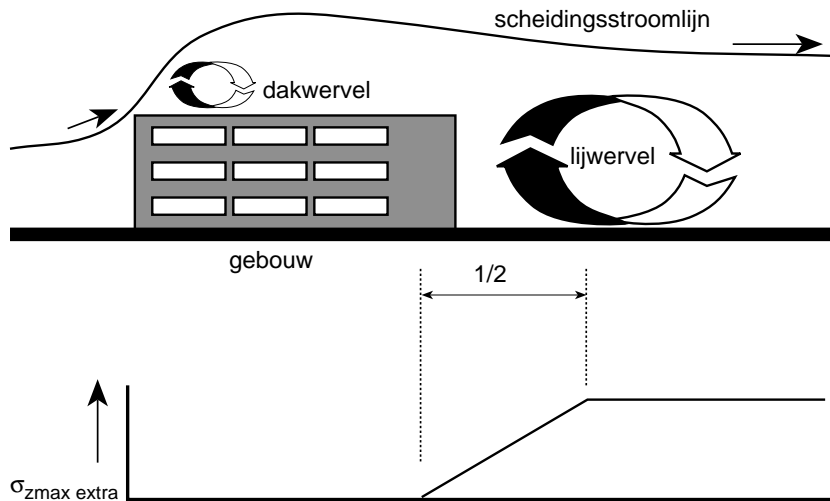
$$\sigma_{yw0} = H \cdot (2.2 - 0.022 \cdot (10 - BPROHSCHEEF)^2)$$

anders geldt:

$$\sigma_{yw0} = H \cdot \left( -0.8 + \frac{3.75 + 1.5 \cdot BPROHSCHEEF}{-4.5 + BPROHSCHEEF} \right)$$

BPROHSCHEEF wordt gebruikt om correlaties met BPROH te corrigeren voor scheve wind aanstroming.

Op pluimhoogte is er een extra verdunning waargenomen in de metingen van Snyder (1976 en 1991) en van Huber (1982 en 1989) in het hart van de pluim. De concentratie wordt met deze extra  $\sigma_z$  in de hoogterichting berekend en is afhankelijk van de verhouding pluimashoog-te/wervelhoogte boven de lijwervel ter plaatse van 3/4 van de lengte. De berekening van de extra verdunning in de pluim wordt boven de lijwervel wel uitgevoerd, maar de resulterende  $\sigma$  wordt met een factor vermenigvuldigd die nul is tot aan de helft van de lijwervel. Van daar tot het eind van de lijwervel groeit de factor tot 1. Zie Figuur 4.



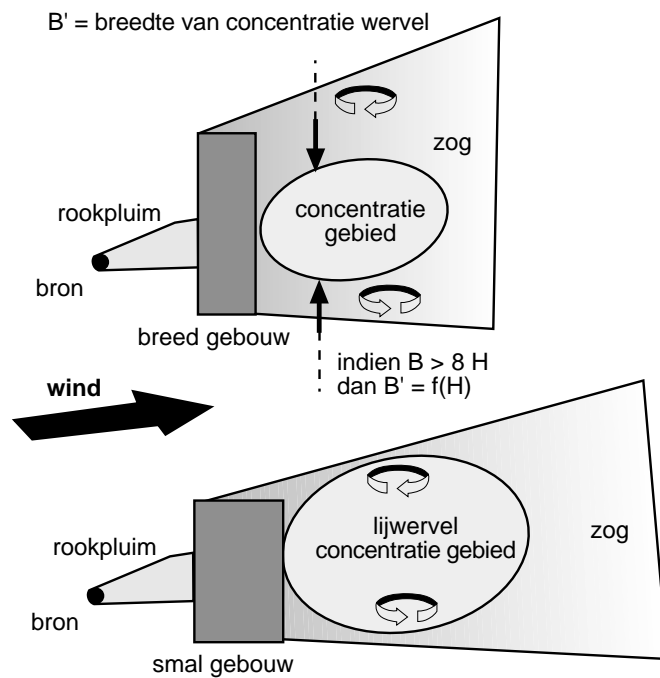
Figuur 4 Extra toename van  $\sigma_z$  in de pluim als functie van de afstand

## 6. Concentraties

### 6.1 Lijwervelconcentraties

De concentratie in de lijwervel wordt berekend met een functie afhankelijk van de gebouwfmetingen en het hoogteverschil tussen scheidingsstroomlijn en gebouw. De fysische achtergrond is dat zich in de lijwervel een evenwicht instelt tussen toevoer en afvoer van de pluim en lucht uit de overwaaiende wind. Het proces in de lijwervel lijkt op dat in een menger, waarover in handboeken van de procestechnologie meer geschreven wordt. Uit metingen blijkt ook dat de dynamiek lijkt op die van een menger. Bij een sprong in het debiet verandert de concentratie geleidelijk en wel volgens een eerste-orde systeem. De concentratie in dit gebied heeft dus een eigen beschrijving, die niet hoort bij de gauss-beschrijving van de pluim erboven. De aanpak in deze rekenmodule wijkt fundamenteel daardoor af van die van Huber, Fackrell en anderen.

Binnen de lijwervel wordt de grondconcentratie constant verondersteld. Zie Figuur 5.



Figuur 5 Lijwervel achter twee gebouwen (bovenaanzicht)

De concentratie in de lijwervel (CONLY) is:

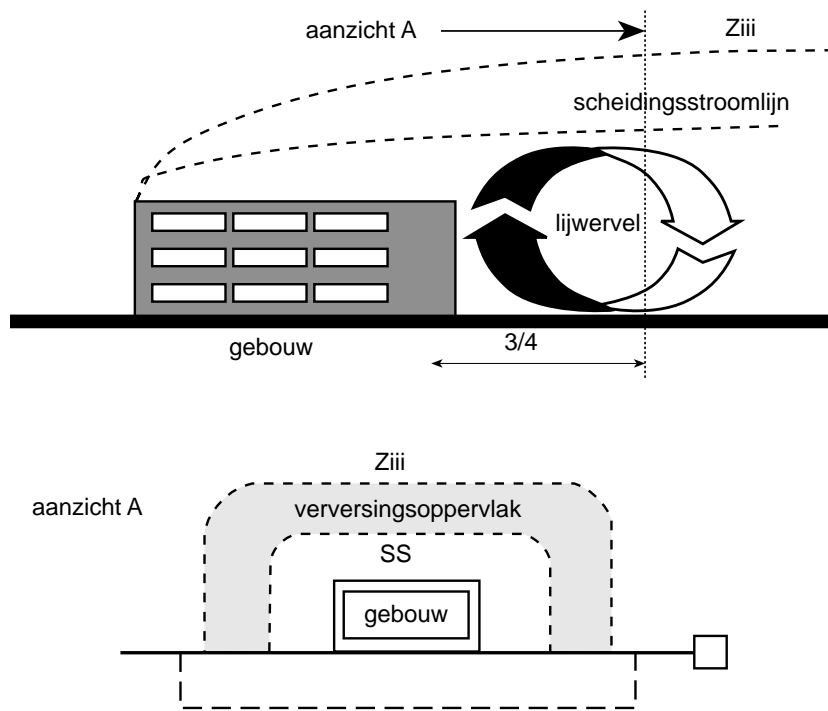
$$CONLY = FR_{lijwervel} \cdot \left( \frac{Q_{emissie}}{u_{dak} \cdot H^2 \cdot 0.9 \cdot VERSOPPHH} \right)$$

Hierin is  $Q_{emissie}$  de totale emissie en  $VERSOPPHH$  is het verversingsoppervlak. Het verversings-oppervlak is dat oppervlak op de scheiding tussen vrije pluim en lijwervel waardoor in- en uitmenging uit de (gesloten) lijwervel plaatsvindt.

$$VERSOPPHH = (ZIIIH3D4 - HSSLY3D4H) \cdot 3 \cdot \frac{SYW3D4}{H} + 2 \cdot HSSLY3D4H$$

$ZIII3D4$  en  $HSSLY3D4H$  worden in paragraaf 2.3 besproken;  $SYW3D4$  is  $\sigma_{yw}$  op  $3/4$  afstand van de lijwervellengte. Zie Figuur 6.

Deze formules zijn getoetst aan metingen van Robins (1977) en Schulman (1991).



Figuur 6 Schematische weergave van het verversingsoppervlak

## 6.2 Pluimconcentraties

De concentratie in het zog achter de grens van de lijwervel wordt op de grond en op pluimashoogte berekend uit de twee volgende bijdragen:

- van de pluim uit de pijp en
- van de pluim uit de lijwervel.

Ook als er geen gebouwinvloed is wordt deze sommatie gemaakt, met een bronsterkte nul in de lijwervel.

In beide gevallen wordt gebruik gemaakt van de bekende gaussische verspreidingsmodule:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q_{emissie}}{2\pi u_{pluim} \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

De pluim uit de lijwervel wordt beschreven in termen van het gaussisch pluimmodel met beginafmetingen in de orde van de gebouwbreedte en -hoogte. Deze termen worden beschreven met een vergelijking die gecorreleerd is op metingen van Huber (1989) aan gebouwen met een breedte van 2 H tot 22 H. Het gaussisch model blijft in gebruik bij elk van de twee pluimen, maar de hoogte en de dispersiecoëfficiënten zijn aangepast.



## 7. Toepassingsgebied

De module is geschikt om als onderdeel in een dispersieprogramma te worden ingebouwd. De module voorziet in berekeningen op één gespecificeerd receptorpunt dat wordt bestreken door één schoorsteen (of uitstroomopening) en één gebouw. De opzet is zodanig dat bij gegeven gebouwgeometrie, bron- en gebouwcoördinaten en een atmosferische toestand (uitgedrukt in parameters windsnelheid, -richting en turbulentie) worden berekend: de pluimhoogte (gecorrigeerd voor gebouwinvloed), de extra dispersie door schoorsteen en gebouwinvloed en indien nodig de grondconcentratie (in de lijwervel). Tevens wordt bepaald of de schoorsteen vrijstaand is (dat wil zeggen: niet beïnvloed door het gegeven gebouw), of de pluim (geheel of gedeeltelijk) in de lijwervel wordt opgenomen en of het opgegeven receptorpunt zich in de lijwervel bevindt.

De module is toepasbaar in de volgende situaties:

- alleenstaande rechthoekige gebouwen met één emissiepunt (voor meerdere emissiepunten mogen de resultaten opgeteld worden)
- het gebouw kan hoog (torenflat-vorm), maar ook breed of smal zijn; kortom van schutting tot naald. Ook relatief lange gebouwen (in de lengterichting van de wind) zijn toegestaan
- de pijp kan op het dak staan, maar ook voor, achter of naast het gebouw
- de pijp kan dus ook in de lijwervel staan
- de uitmonding van de pijp kan lager dan het gebouw zijn
- de hoek die de wind maakt ten opzichte van het gebouw mag willekeurig ingevuld worden: inbouw in een lange-termijnmodel is dus mogelijk
- de “lijwervel” concentraties worden eveneens berekend
- concentraties op zeer korte afstand (< 100 m) van een gebouw zijn hiermee te berekenen
- de module is bedoeld voor inerte stoffen
- er wordt rekening gehouden met impulsstijging dan wel stijging door warmte-inhoud: warme pluimen kunnen ook doorgerekend worden.

Hierbij moet het volgende in gedachten gehouden worden:

- de concentratie op willekeurige hoogte (en plaats) kan berekend worden, maar grondconcentraties zijn het meest betrouwbaar; voor hoogten boven de pluimas is de module niet altijd betrouwbaar. Er wordt immers een correctie op de dispersieparameters  $\sigma_y$  en  $\sigma_z$  toegepast met als doel om grondconcentraties goed te beschrijven. De  $\sigma_y$ - en  $\sigma_z$ -waarden aan de bovenzijde van de pluim worden echter op dezelfde wijze gecorrigeerd, met als waarschijnlijk gevolg dat de uitgestrektheid van de pluim naar boven toe wordt overschat. De methode wordt wel aanbevolen voor hoogten, die lager zijn dan pluimas
- de module is ontworpen voor gebouwen met rechthoekige randen. Daarom is de module niet zonder meer geschikt voor ronde of gestroomlijnde gebouwen. In die gevallen kan een stromingsdeskundige de lengte van de dakwervel en lijwervel in het model wellicht met een nader in te vullen factor verminderen
- de module is ontworpen om de baan van een pluim boven het midden van het gebouw te berekenen. Daarom zijn de uitkomsten onbetrouwbaar als de emissie-afvoer aan de zijkant

van het gebouw staat. De redenen zijn dat een kurkentrekkervormige stroming, die aan de zijkanten van het dak begint, de emissie tot laag bij de grond kan voeren. Voor een lange-termijn toepassing zal dit effect geen grote invloed hebben gezien de kleine kans dat deze precieze aanstroombinding optreedt. Voor een korte-termijn toepassing dient men zich dit te realiseren. Een tweede reden is dat de windrichting varieert en daardoor de lijwervel van plaats verandert

- in de module wordt niet de laterale verplaatsing van de pluim berekend als het gebouw scheef aangestroomd wordt. De plaats van de berekening wordt alleen in de lengterichting opgegeven. In werkelijkheid wordt de pluim door het gebouw iets opzij geleid
- aangenomen wordt dat de pluim al “vrij” van het gebouw is als de as van de pluim het gebouw niet snijdt, in deze gevallen zal de pluim dus langs het gebouw heen gaan en niet beïnvloed worden. Gedeeltelijke beïnvloeding via zijwaartse stroming wordt dus niet beschouwd
- de pluimbanen worden in de module zo beschreven dat deze òf over het gebouw heen òf er langs gaan
- in de module wordt aangenomen dat er in het gehele gebied waar de lijwervel de grond raakt (concentratiegebied) één gemiddelde concentratie heerst
- de verbreding van de lijwervel door de zijwervels wordt niet berekend. Daardoor zijn de berekende lijwervelbreedte en de berekende zogbreedte iets te smal
- de module gaat uit van een soortelijke massa van de afgassen welke ongeveer gelijk is aan die van de lucht in de omgeving. Voor koude (“zware”) pluimen, waarbij  $T_{\text{pluim}} \leq T_{\text{omgeving}}$  is, zijn geen voorzieningen ingebouwd. In die gevallen kan een methode van Shell (1994) toegepast worden
- de methode gaat ervan uit dat de turbulentie, die gegenereerd wordt door de wind-gebouw-interactie dominant is, met andere woorden er wordt aangenomen dat nabij het gebouw de verspreiding niet wordt bepaald door de atmosferische stabiliteit. De atmosferische stabiliteit wordt dus niet in rekening gebracht; de atmosfeer wordt nabij het gebouw als “neutraal” verondersteld.



## 8. Software-beschrijving

### 8.1 Modulestructuur

De module is in Fortran 77 geschreven. De software is geprogrammeerd als een set van subroutines met een parameterlijst, waarmee de receptorgegevens en de relevante gebouw- en meteorologische parameters kunnen worden doorgegeven. Koppeling met een Pascal-programma of andere computertalen is in principe mogelijk. In de toepassingssoftware wordt één principale subroutine aangeroepen (GEBOUW): hiermee worden voor de heersende meteo-omstandigheden de ligging van de lijwervel, dakwervel, en afmetingen ervan alsmede pluimstijging berekend (impuls- of buoyancy-stijging) en voorts worden voor een willekeurig gridpunt de onderlinge posities bepaald en de uiteindelijke gecorrigeerde pluimparameters (dispersie, pluimhoogte en eventueel concentraties) als uitvoer teruggegeven. De verschillende formuleringen van de module zijn voorts onderverdeeld in 40 subroutines. Aanroep van de overige subroutines geschiedt uitsluitend door één principale subroutine (GEBOUW).

### 8.2 In- en uitvoer van de module

Voor het aanroepen van de ontwikkelde rekenmodule zijn de volgende invoergegevens van belang (zie Tabel 1). Voor het aanroepen van de gebouwmodule zijn enige invoergegevens nodig, welke zonder veel moeite in een pluimmodel, dat is gebaseerd op moderne grenslaagmethodieken, beschikbaar zullen zijn. In het nieuwe Nationaal Model zijn deze parameters in ieder geval alle beschikbaar, zij het niet op de vereiste hoogten.

Als uitvoer worden 11 parameters teruggegeven aan het hoofdprogramma, op basis waarvan de berekeningen voor het gaussisch pluimmodel kunnen worden voortgezet. De routine is op zich eenduidig beschreven in dit hoofdstuk, maar inbouw in het pluimmodel vereist kennis en inzicht in de gemodelleerde processen. Bovendien moeten enkele keuzen gemaakt worden bij deze inbouw. Deze aandachtspunten worden in paragraaf 8.3 beschreven.

Voor een aanbeveling voor de berekening van de turbulentieparameters  $sv$  en  $sw$  wordt verwezen naar de beschrijving van het Nationaal Model (1997). De minimale en maximale waarden die in Tabel 1 zijn aangegeven zijn uitersten ter bescherming van de werking van de routine; waarden die buiten deze grenzen vallen worden gemeld en de routine wordt afgebroken met vermelding van de reden. De turbulentie-intensiteit ( $\sigma_{v,w}/u$ ) ter berekening van concentraties in de lijwervel worden op de minimale waarde van 0.1 begrensd (voor de overige gebieden geldt de ondergrens van 0.001). Deze ondergrens van 0.1 wordt als een waarde voor neutrale condities gebruikt; in de lijwervel zullen geen lagere waarden kunnen optreden (zoals bijvoorbeeld in stabiele situaties 's nachts) door de productie van turbulentie door het gebouw zelf.

Tabel 1 Invoerparameters voor de gebouwmodule

parameter	eenheid	minimale waarde	maximale waarde	type variabele
X coördinaat van het gridpunt waarop de concentratie berekend moet worden	m	0	25000	real
Y coördinaat van het gridpunt waarop de concentratie berekend moet worden	m	0	25000	real
X coördinaat van het midden van het gebouw	m	0	25000	real
Y coördinaat van het midden van het gebouw	m	0	25000	real
hoogte van het gebouw	m	3	200	real
korte zijde van het gebouw	m	1	999	real
lange zijde van het gebouw	m	1	999	real
hoek tussen de lange zijde van het gebouw en de X-as	graden	0	180	real
X coördinaat van de schoorsteen	m	0	25000	real
Y coördinaat van de schoorsteen	m	0	25000	real
hoogte van de schoorsteen	m	1.5	300	real
binnendiameter van de schoorsteen	m	0.1	30	real
buitendiameter van de schoorsteen	m	0.1	30	real
volumedebiet van de rookgassen	(nm <sup>3</sup> /s)	1	2000	real
warmte-output van de rookgassen	(MW)	0	500	real
emissie	(kg/s/ ge*10 <sup>-9</sup> /s)	0	100	real
windsnelheid op 10 m	m/s	0.5	50	real
windrichting op 10 m	graden	0	360	real
ruwheidslengte receptorpunt	m	0.03	2	real
turbulentie-intensiteit voor de y richting ( $\sigma_v/u$ )	m/s	0.001	5	real
turbulentie-intensiteit voor de z richting ( $\sigma_w/u$ )	m/s	0.001	5	real

Als uitvoergegevens geeft de rekenmodule:

- 1 schoorsteen vrijstaand (indien true; dan is er geen beïnvloeding door een gebouw en dient de gebouwmodule verder niet toegepast te worden. Indien false dan is er wel beïnvloeding door een gebouw en dient de gebouwmodule toegepast te worden)
- 2 gridpunt binnen het gebied van de lijwervel. Indien true; dan bevindt de pluim zich (deels) in de lijwervel. Indien false; dan ligt gridpunt niet binnen het gebied van de lijwervel)
- 3 op het gridpunt de berekende grondconcentraties (mg/m<sup>3</sup> of geureenheden/m<sup>3</sup>)
- 4 hoogte van de pluimas ter hoogte van het gridpunt (in meters, haaks op de pluimas); indien negatief, dan ligt de pluim niet boven het gridpunt)
- 5 hoogte van het centrum van de lijwervel ter hoogte van het gridpunt (in meters, haaks op de wervelas); indien negatief dan ligt de lijwervel niet boven het gridpunt)
- 6 fractie van de emissie in de vrije pluim (kg/s of geureenheden \* 10<sup>-9</sup>/s)
- 7 fractie van de emissie in de lijwervel (kg/s of geureenheden \* 10<sup>-9</sup>/s)
- 8  $\sigma_{z0}$  van de pluim direct nabij de schoorsteen - initiële  $\sigma$  (m)
- 9  $\sigma_{y0}$  van de pluim direct nabij de schoorsteen - initiële  $\sigma$  (m)

- 10  $\sigma_{wz0}$  van de concentratie-lijwervel in het snijpunt van de as met de lijzijde van het gebouw (m)
- 11  $\sigma_{wy0}$  van de concentratie-lijwervel in het snijpunt van de as met de lijzijde van het gebouw (m)

Voor een illustratie van de betekenis van de initiële  $\sigma$ 's en de waarden van  $\sigma_y$  en  $\sigma_z$  van de concentratie-lijwervel, zie Figuur 7.

Indien uitvoerparameter 1 true is, dan wordt de pluim niet door een gebouw beïnvloed en behoeft de gebouwmodule niet gebruikt te worden.

Indien uitvoerparameter 1 false is en uitvoer 2 is *true*, dan wordt de grondconcentratie in de lijwervel berekend, die binnen de gehele lijwervel constant wordt verondersteld. De resterende uitvoergegevens zijn in dat geval niet meer van belang.

Indien de uitvoerparameters 1 en uitvoer 2 beide *false* zijn en de uitvoerparameters 4, 5 en 8 tot en met 11 zijn *negatief*, dan wordt het roosterpunt niet door de pluim bestreken (doordat het gridpunt bijvoorbeeld bovenwinds ligt of ver bezijden de pluim) en wordt er niets uitgerekend (concentraties zijn dus nul).

Indien de uitvoerparameters 1 en 2 beide *false* zijn en de uitvoerparameters 4, 5 en 8 tot en met 11 hebben een *positieve* waarde, dan worden de verschillende *s*'s van pluim en lijwervel berekend. De uitvoerparameters 6 en 7 geven dan de pluimfracties over respectievelijk de vrije pluim en de lijwervel.

### 8.3 Aandachtspunten bij inbouw in dispersiemodellen

De bovenstaande beschrijving van de module maakt inbouw van de module in een lange-termijn model mogelijk. Een aantal punten compliceert de inbouw echter.

Dit betreft:

- 1 de interactie van de pluim met de top van de grenslaag (menghoogte)
- 2 de atmosferische stabiliteit en turbulentieparameters
- 3 de te berekenen rookpluimstijging alsmede impulsstijging
- 4 vervolgberekeningen met twee aparte pluimen
- 5 herberekeningen van transportsnelheid, turbulentieparameters op pluimhoogte en massazwaartepunt van de pluim.

Deze punten zullen achtereenvolgens worden besproken. Tot slot zullen als punt 6 overige aandachtspunten worden genoemd en zullen enkele testsuggesties gedaan worden.

Bij deze punten moet bedacht worden dat:

- de gebouwmodule per gridpunt moet worden aangeroepen;
- sommige parameters na de gebouwmodule moeten worden herberekend;

- er twee pluimen door de gebouwmodule kunnen worden teruggegeven;
- de gebouwmodule kan aangeven dat er toch geen gebouwinvloed is en dat met name de pluimstijging (door warmte of impuls) dan alsnog moet worden berekend.

### 8.3.1 De interactie van de pluim met de top van de grenslaag (menghoogte)

De interactie van pluim met de top van de menglaag (de inversie) levert een potentieel probleem op. In de oude aanbeveling van 1986 was de minimale grenslaaghoogte 200 m, zodat hierbij geen probleem optrad; immers gebouwen van 200 m hoogte zijn in Nederland niet aan de orde. In de aanbevelingen voor het nieuwe Nationaal Model is een minimale grenslaaghoogte van 50 m opgenomen en deze waarde is zo laag dat de toppen van sommige gebouwen hierboven uit zullen steken. Er treedt dan een inconsistentie in de modellering op. De dispersieberekening houdt rekening met een gelaagde atmosfeer, waarbij de rookpluim in de stabiele bovenlaag (de transportlaag) boven de inversie kan penetreren. Echter, de gebouwmodule veronderstelt een neutrale atmosfeer en veronderstelt dat de processen zich in de grenslaag afspeelen. Bovendien kent het NNM alleen beschrijvingen van dispersieprocessen in de grenslaag en niet erboven.

In het NNM is ervoor gekozen om de berekende grenslaaghoogte (met een minimum van 50 m) ondanks de aanwezigheid van gebouwen onveranderd te laten. De reden hiervoor is driedig:

1. Gebouwen staan meestal in steden, waar de ruwheid 1 m of hoger is. In het model is een ondergrens voor de menglaaghoogte opgenomen, welke (indirect) afhankelijk is van de terreinruwheid. Voor stabiele situaties (Obukhov-lengte  $L > 0$ , maar  $L < 1000$ ) wordt als eis gesteld dat  $L \geq 100 \cdot z_0$ , en aangezien de grenslaaghoogte een functie is van de  $L$  en  $u^*$  via

$$z_i = \frac{0.07u^*/f}{1 + 0.32z_i/L} \quad (1)$$

wordt de dikte van grenslaag in steden groter dan de hoogte van gebouwen, waardoor het probleem niet vaak zal optreden

2. Beperkte grenslaaghoogten zullen dan nog alleen optreden bij lage windsnelheden, zodat die situaties waarbij een gebouw boven de grenslaaghoogte uitsteekt bij deze lage windsnelheden zal optreden. Het lijkt dan realistisch om aan te nemen dat in deze gevallen het gebouw de menglaaghoogte niet beïnvloedt.
3. Het aanpassen van de grenslaaghoogte kan niet lokaal, zodat de aanpassing automatisch voor het hele rekengebied zal gelden, dus voor alle gridpunten. Dit kan leiden tot onrealistische waarden van de grenslaaghoogte voor alle andere gridpunten, dan welke in de directe invloedssfeer liggen van het gebouw

Op dit punt behoren in de toekomst aanvullende afspraken gemaakt te worden hoe hiermee dient omgegaan te worden. Immers, hoewel het niet geheel ondenkbaar is dat gebouwen boven de inversie kunnen uitsteken, zal de meest voorkomende situatie zo zijn, dat lokaal de grenslaaghoogte verstoord zal zijn door de stroming om het gebouw heen. Het bezwaar van de hier gekozen methode is dat er discontinuïteiten ontstaan voor situaties die geleidelijk overgaan van

met gebouwinvloed naar geen gebouwinvloed. Bovendien wordt gedeeltelijke penetratie, zoals in het Nationaal Model opgenomen, bij gebouw invloed niet toegepast, zodat ook hierdoor een discontinuïteit optreedt. De gedeeltelijke penetratie wordt natuurlijk gehandhaafd wanneer het een vrije pluim betreft (geen gebouwinvloed). Bij beïnvloeding door het gebouw wordt de pluimhoogte gecorrigeerd en wordt (alleen voor deze situatie) bepaald of dan nog transport in de grenslaag of in de transportlaag plaatsvindt. Dit criterium bepaalt of er geen of gehele penetratie (aan/uit criterium) in de inversie plaatsvindt.

### 8.3.2 De atmosferische stabiliteit

De gebouwmodule heeft als invoerparameters waarden van de turbulentie-intensiteit  $\sigma_v/u_{10}$  en  $\sigma_w/u_{10}$ . De waarden van  $\sigma_v$  en  $\sigma_w$  zijn daarbij bepaald op de hoogte van de schoorsteentop. Voor het bepalen van de windsnelheid wordt in de gebouwmodule gerekend met het logaritmisch windprofiel voor neutrale condities. Deze windsnelheid wordt gebruikt om de fysische toestand rond het gebouw te karakteriseren, waarbij de pluimstijging wordt berekend. Dit is in de module ingebouwd en heeft geen speciale voorzieningen in de rest van het rekenprogramma. Nadat de gebouwroutine is doorgerekend moet de windsnelheid op pluimhoogte worden herberekend op het betreffende gridpunt. Dit geldt overigens ook voor andere parameters zoals de waarden van  $\sigma_v$  en  $\sigma_w$  en de lagrangiaanse tijdschaal  $T_L$ . Andere zaken de stabiliteit betreffende zijn niet aan de orde. Deze herberekeningen moeten plaatsvinden in samenhang met de mogelijkheid dat er met twee pluimfracties moet worden verder gerekend in het hoofdprogramma.

### 8.3.3 De te berekenen rookpluimstijging

De rookpluimstijging geschiedt in het Nieuwe Nationale Model door onderscheid te maken tussen stabiele, neutrale en instabiele situaties. Wanneer er sprake is van een warme rookpluim neemt de gebouwmodule deze taak over; echter wordt dan met een neutrale atmosfeer gerekend. De stapsgewijze berekeningsmethode wordt dan overgeslagen en de pluimstijging geschiedt door toepassing van formule 59. De module houdt dus geen rekening met een gelaagde atmosfeer met veranderende waarden van windsnelheid en temperatuurgradiënt. Bij gebouwinvloed kan als gevolg ook de normale inversie-penetratie niet berekend worden. De inversie-penetratiegraad wordt dan volgens een vereenvoudigde methode berekend.

De gedeeltelijke penetratie wordt natuurlijk gehandhaafd wanneer het een vrije pluim betreft (geen gebouwinvloed). Bij beïnvloeding door het gebouw wordt de pluimhoogte gecorrigeerd door de gebouwmodule. In het hoofdprogramma wordt bepaald of de pluimas zich in de grenslaag of in de transportlaag bevindt. Dit criterium bepaalt of er geen of gehele penetratie in de inversie plaatsvindt. Er wordt dus geen gedeeltelijke penetratie in de inversie berekend.

Wanneer de module aangeeft dat de situatie toch een vrijstaande schoorsteen betreft (er is dus geen gebouwinvloed) moet de pluimstijging volgens voorschrift (zie deelrapport I, hoofdstuk 3.8) *alsnog* worden berekend. *In dat geval* hoeft dit echter maar éénmaal te geschieden

omdat de pluimstijging voor alle gridpunten dezelfde is. Dit geldt ook voor de impulsstijging en voor de bijdrage van de warmte-inhoud en schoorsteeneffect aan de initiële dispersieparameters  $\sigma_y$  en  $\sigma_z$ . De gebouwmodule neemt ook de berekening van de impulsstijging en van de bijdrage van de warmte-inhoud en schoorsteeneffect aan de initiële dispersieparameters  $\sigma_y$  en  $\sigma_z$  over indien er wel gebouwinvloed is. Indien er geen gebouwinvloed is, moet dus - in voorkomende gevallen - ook de impulsstijging nog worden berekend. Er moet in deze situatie goed op gelet worden dat gebouwbijdragen aan  $\sigma_y$  en  $\sigma_z$  op nul worden gesteld.

In tegenstelling hiermee, zou men er in de toekomst ook voor kunnen kiezen om de stijging van de rookpluim ná gebouwinvloed te laten doorgaan. Daarmee wordt toepassing van een geïntegreerd model ook goed mogelijk voor schoorstenen met een flinke warmte-emissie, die door een gebouw wordt beïnvloed. Met name voor deze schoorstenen is sprake van een discontinuïteit.

### 8.3.4 Vervolgberoeeningen met twee pluimen

In sommige gevallen zal de module aangeven dat er *twee aparte* pluimen worden teruggegeven aan het hoofdprogramma. De ene pluim betreft de pluimfractie die in de lijwervel is opgenomen. Daarvoor geldt:

- De bijdrage van de warmte-inhoud en schoorsteeneffect aan de initiële dispersieparameters  $\sigma_y$  en  $\sigma_z$  is nul.
- De fractie in de menglaag is altijd 1.
- De initiële bijdragen aan  $\sigma_y$  en  $\sigma_z$  ten gevolge van de lijwervelbreedte moet verrekend worden. Deze waarden zijn door de module als  $\sigma_{wy0}$  en  $\sigma_{wz0}$  gegeven. De andere initiële bijdragen aan  $\sigma_y$  en  $\sigma_z$  worden op nul gezet (ten gevolge van schoorsteen down wash en buoyancy).
- De effectieve pluimhoogte is gelijk aan de hoogte van het midden van de lijwervel.
- De turbulentieparameters en de transportsnelheid (windsnelheid) voor deze pluim worden herberekend op de hoogte van het midden van de lijwervel (als startwaarde, op het betreffende gridpunt kan het pluimzwaartepunt al hoger zijn geworden door dispersie).

De andere pluimfractie is die van de doorgaande pluim, die mogelijk een daling heeft ondergaan ten gevolge van het gebouweffect. Voor deze pluimfractie geldt:

- De bijdrage van de warmte-inhoud en eventueel schoorsteeneffect aan de initiële dispersieparameters  $\sigma_y$  en  $\sigma_z$  moet verrekend worden.
- De pluimfractie in de menglaag is of 1 of 0. Het criterium is bepaald door de vraag of de gecorrigeerde effectieve pluimhoogte hoger is dan de grenslaaghoogte.
- De gecorrigeerde effectieve pluimhoogte is gegeven door de gebouwmodule.
- De turbulentieparameters en de transportsnelheid (windsnelheid) voor deze pluim worden herberekend op de hoogte van de gecorrigeerde effectieve pluimhoogte.

De som der emissiefracties uit beide pluimfracties (pluim uit de lijwervel en de vrije pluim) is natuurlijk 1. De penetratiefractie (in de eventuele inversie) is hierin nog niet verrekend!

### 8.3.5 Herberekeningen van transportsnelheid, turbulentieparameters op pluimhoogte en massa-zwaartepunt van de pluim.

De turbulentieparameters  $\sigma_v$ ,  $\sigma_w$  en  $T_1$  alsmede de transportsnelheid moeten dus na aanroep van de gebouwmodule worden herberekend voor de veranderde hoogte van de pluimas en voor de hoogte van de lijwervel, indien deze aanwezig is. Binnen het hoofdprogramma moeten deze waarden goed geadmistreerd worden. Voor  $\sigma_{v1}$  geldt een andere procedure. Deze vertegenwoordigt immers de niet-hoogte-afhankelijke langzame fluctuaties, die eenmaal bepaald worden voordat de loop voor alle gridpunten wordt gestart. De herberekeningen gelden dus niet voor  $\sigma_{v1}$ .

De berekening van de dispersieparameters op een willekeurig gridpunt vindt dus plaats na de bepaling van gebouwinvloed. Dit is belangrijk omdat de hoogten van de twee mogelijke afzonderlijke pluimen bepalen welke dispersie er plaats vindt. In deze routine ter berekening van  $\sigma_y$  en  $\sigma_z$  vindt later dan de berekening plaats van het massazwaartepunt, waarna opnieuw herberekening plaatsvindt van de transportsnelheid.

Wanneer deze berekeningen zijn afgerond, wordt de concentratie berekend (alleen indien het gridpunt zich niet in de lijwervel bevindt) door invulling van de gaussformule. De bijdragen van de twee mogelijke pluimen worden tenslotte opgeteld. In tabel 2 is de volgorde van de berekeningen in het gaussisch pluimmodel aangegeven.

### 8.3.6 Overige aandachtspunten

De module is oorspronkelijk in Fortran 77 geschreven. De software is geprogrammeerd als een set van subroutines met een parameterlijst, waarmee de receptorgegevens en de relevante gebouw- en meteorologische parameters kunnen worden doorgegeven. De parameters zijn beschreven in het Paarse boek. Koppeling met een Pascal-programma of andere computertalen is in principe mogelijk. In de toepassingssoftware wordt in de loop voor alle gridpunten éénmaal de subroutine GEBOUW aangeroepen. Hiermee worden voor de heersende meteoromstandigheden de ligging van de lijwervel, dakwervel, en afmetingen ervan alsmede pluimstijging berekend (impuls- of buoyancy-stijging) en voorts worden voor een willekeurig gridpunt de onderlinge posities bepaald en de uiteindelijke gecorrigeerde pluimparameters (dispersie, pluimhoogte en eventueel concentraties) als uitvoer teruggegeven. De verschillende formuleringen van de module zijn voorts onderverdeeld in 40 subroutines. Aanroep van de overige subroutines geschiedt uitsluitend door één principale subroutine (GEBOUW).

Door de inbouw van gebouwinvloed worden enkele andere berekeningen, waarvoor het NNM bedoeld is, niet meer mogelijk; dit betreft:

- dispersieberekeningen voor  $\text{NO}_2$  (deze zijn niet mogelijk omdat de omzettingsmodule uitgaat van puntbronnen. Uitbreiding naar het virtuele puntbronconcept is in principe mogelijk en is geen uitputtende actie, maar niet nog voorzien). Dit concept rekent de oppervlaktebron terug naar een puntbron door gebruik te maken van de actuele waarde van  $\sigma_y$ ;

- depositieberekeningen (het berekenen van de depositiesnelheid wordt geblokkeerd doordat de berekende reguliere depositiesnelheden niet meer geldig zijn in de nabijheid van een gebouw).

Een en ander maakt dat berekeningen voor sterk op elkaar lijkende situaties toch verschillende resultaten kunnen opleveren, afhankelijk of de gebouwmodule een invloed aangeeft of niet. Indien geen invloed wordt gevonden verkrijgt men dezelfde resultaten als wanneer men aangeeft dat het een vrijstaande schoorsteen betreft. Wellicht moet hiervoor in de toekomst nog een aangescherpte aanbeveling gegeven worden.

### 8.3.7 Suggesties voor het testen

De volgende testen zijn nodig om de integrale werking van het programma te testen:

- Bij inbouw is het goed te controleren of het geïntegreerde programma identieke resultaten geeft wanneer gerekend wordt zonder een gebouw en bij opgave van een (ten opzichte van de schoorsteenhoogte) klein gebouw.
- Diverse bronnen met gebouwen worden afzonderlijk doorgerekend en ook in één run. De som moet in beide gevallen hetzelfde zijn.

### 8.3.8 Consistentietesten

De consistentie van het gedrag van de gebouwroutine is op enkele punten getest bij de ontwikkeling van de module. Dit is vertaald in enkele concrete punten:

- 1 Wanneer de schoorsteenhoogte op een gebouw toeneemt moet het effect van het gebouw afnemen; bij een hoge schoorsteen maakt het niet meer uit of er een gebouw naast staat of niet.
- 2 Wanneer een gebouw van een bepaalde hoogte (bijvoorbeeld 50 m) steeds smaller wordt, nadert de situatie tot die met een gewone schoorsteen, het moet dan niet meer uitmaken of er een gebouw staat of niet.
- 3 Wanneer men ver van een bron+gebouw verwijderd is, maakt het niet meer uit of er gebouw-invloed is of niet.

De resultaten van berekeningen met NNM laten het volgende zien:

- 1 Bij toenemende schoorsteenhoogte (bij hetzelfde gebouw) reduceert de gebouwinvloed tot nul.
- 2 Indien de gebouwafmetingen naderen tot een zuilvorm (zeg een vierkante schoorsteen) reduceert de gebouwinvloed tot nul.
- 3 In het verre veld neemt de gebouwinvloed inderdaad tot nul af.



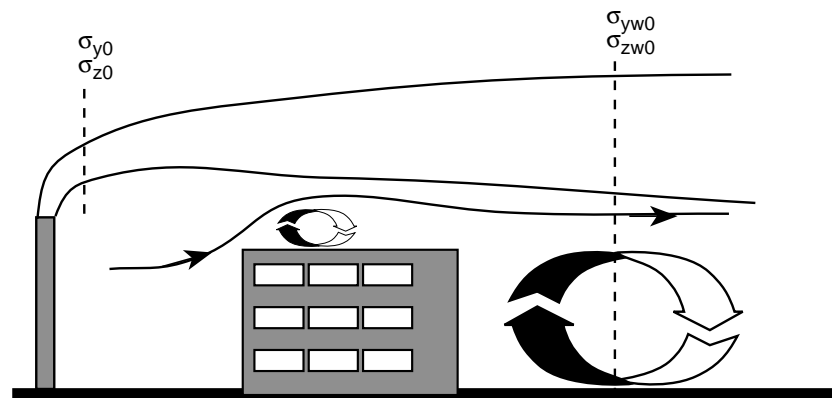
Tabel 2 Schematische volgorde van berekeningen

No	Programma onderdeel	Omschrijving
1	Per uur	Controleer alle invoer op consistentie en geldigheid.
2	Per gridpunt	Bereken de windsnelheid op schoorsteenhoogte, benevens turbulentieparameters $\sigma_{vi}$ en $\sigma_{wi}$ .
3	Per gridpunt	Roep de gebouwroutine aan.
4	Per gridpunt	Bepaal of gridpunt door de pluim beïnvloed wordt.
5	Per gridpunt	Bepaal of gridpunt in de lijwervel ligt, indien ja, concentratie is bekend.
6	Per gridpunt	Bepaal of er een lijwervelpluim toegevoegd moet worden.
		Bepaal of het een vrijstaande schoorsteen betreft, indien ja, dan berekenen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• schoorsteeninvloed (gevolg: pluimdaling).</li> <li>• pluimstijging (dit behoeft dan slechts eenmaal te geschieden!).</li> <li>• transportsnelheid op pluimhoogte.</li> <li>• Indien effectieve schoorsteenhoogte &gt; menghoogte, dan menglaagfractie=0.</li> <li>• Indien effectieve schoorsteenhoogte ≤ menghoogte, dan menglaagfractie=1.</li> <li>• Initiële <math>\sigma_y</math> en <math>\sigma_z</math> vaststellen (geen bijdrage van gebouw).</li> </ul> Indien nee, dan bij eerste pluim (vrije pluim): <ul style="list-style-type: none"> <li>• herbereken transportsnelheid;</li> <li>• door de gebouwmodule bepaalde effectieve schoorsteenhoogte overnemen;</li> </ul>
7	Per gridpunt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ken emissie-deel van vrije pluim aan deze pluim toe;</li> <li>• herbereken turbulentieparameters op pluimhoogte;</li> <li>• indien effectieve schoorsteenhoogte &gt; menghoogte, dan menglaagfractie=0;</li> <li>• indien effectieve schoorsteenhoogte ≤ menghoogte, dan menglaagfractie=1;</li> <li>• initiële <math>\sigma_y</math> en <math>\sigma_z</math> vaststellen (wel bijdrage van gebouw);</li> </ul> bij tweede pluim (lijwervelpluim); <ul style="list-style-type: none"> <li>• herbereken transportsnelheid;</li> <li>• ken emissie-deel van lijwervelpluim aan deze pluim toe;</li> <li>• herbereken turbulentieparameters;</li> <li>• menglaagfractie=1;</li> <li>• initiële <math>\sigma_y</math> en <math>\sigma_z</math> vaststellen (bijdrage van lijwervel);</li> <li>• effectieve hoogte pluim = midden lijwervel = zwaartepunt pluim (voorlopig).</li> </ul>
8	Per gridpunt	Bereken normale dispersie voor deze bronafstand met aangepaste <ul style="list-style-type: none"> <li>• effectieve hoogte pluim;</li> <li>• <math>\sigma_y</math> en <math>\sigma_z</math>;</li> <li>• transportsnelheid.</li> </ul>
9	Per gridpunt	Bereken concentratie voor niet-lijwervel situatie.



## 9. Metingen

De gebouwmodule is ontwikkeld door gebruik te maken van een groot aantal beschikbare windtunnelproeven. Betrouwbare resultaten van veldmetingen zijn schaars, vanwege de hoge kosten die hieraan zijn verbonden. Voorbeelden van veldexperimenten, die in de literatuur zijn te vinden, betreffen een dataset door EPRI opgebouwd en enkele gezamenlijke metingen door KEMA en NERI uitgevoerd. De methode is daarom geheel gebaseerd op windtunnelproeven. De vergelijking tussen berekende en gemeten waarden geeft een indicatie van de nauwkeurigheid. Hierbij moet bedacht worden dat ook windtunnelexperimenten een model vormen van de werkelijkheid. In veldsituaties treden complicerende factoren op die de onnauwkeurigheid doen toenemen.



Figuur 7 Betekenis van initiële dispersieparameters

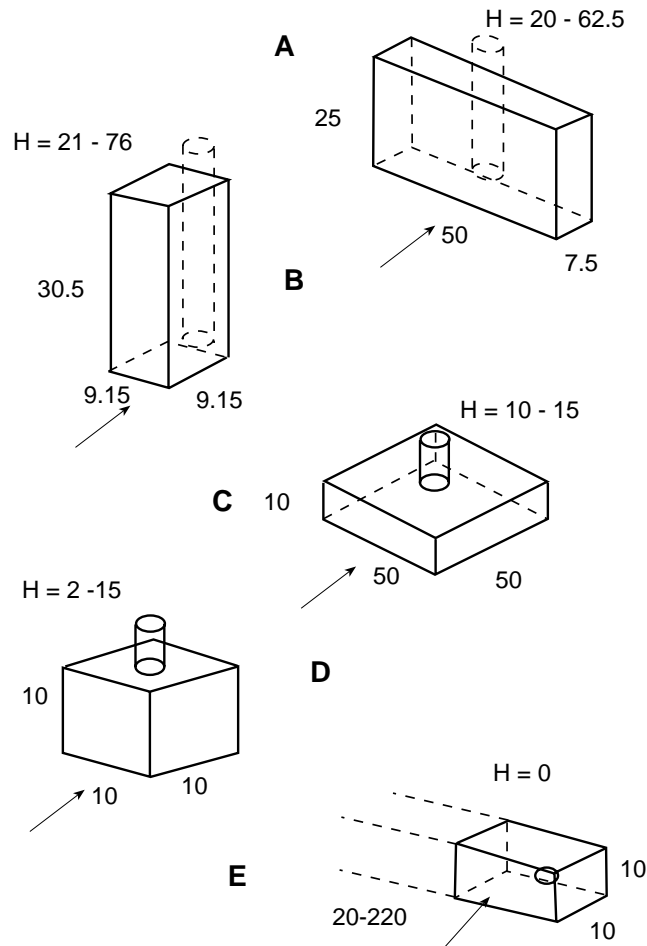
### 9.1 Geselecteerde metingen

De volgende referenties waarin windtunnelexperimenten zijn beschreven zijn gebruikt. Alle dimensies in de windtunnel zijn gerelateerd aan de gebouwhoogte  $H$ .

Huber en Snyder (1982), schoorsteen achter gebouw, hoogte van 1.2 tot 2.5 maal de gebouwhoogte en een grondbron;  $B/H = 2$ ;  $L/H = 0.3$ ; uittreesnelheid/windsnelheid = 0.7 tot 8.4; metingen op afstand 3 tot 10  $H$ ; proeven met lichtere rook zijn niet nagerekend.  $z_0$  uit de afstand en hoogte van de gebouwen op de grond berekend volgens Van Melle (1995) is 1.3 mm. Figuur 8, gebouwtype A.

Snyder en Lawson (1976), schoorsteen achter gebouw, hoogte van 0.7 tot 2.5 maal de gebouwhoogte;  $B/H = 0.3$  en  $2$ ;  $L/H = 0.3$ ; uittreesnelheid/windsnelheid = 2.5; metingen op afstand 3

H. Ogenshijnlijk liggen de gebouwen hetzelfde als in Huber en Snyder (1982). Figuur 8, gebouw-type B.



Figuur 8 Verschillende gebouwvormen van windtunnelexperimenten

Schulman en Scire (1993), schoorsteen in het midden van een laag dak. Hoogte van 1.0 tot 1.5 maal gebouwhoogte. Metingen in en achter de lijwervel, op afstand 3 tot 14 H; gebouw B/H = 5; L/H = 5; uittreesnelheid/windsnelheid = 0.75 tot 5. Figuur 8, gebouwtype C.

Robin en Castro (1977), schoorsteen in het midden van een dak en ook uit gaten in de lijwand. Hoogte van 0.2 tot 1.5 maal gebouwhoogte. Metingen in en achter de lijwervel; gebouw is een kubus. Figuur 8, gebouwtype D.

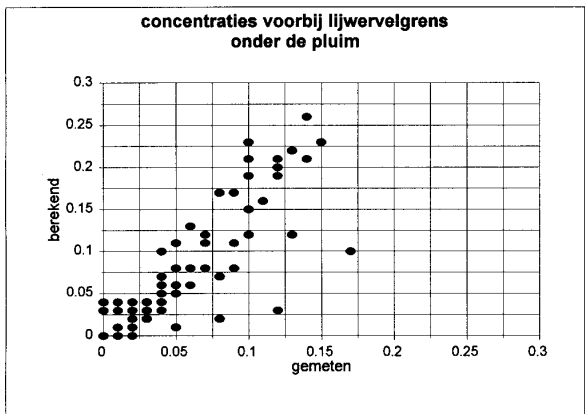
Huber (1989), bron in het midden van lijwand, op de grond. Volgens onze eigen waarnemingen aan dergelijke gebouwen is dat in een "sublijwervel" die er bij loodrechte wind bestaat, waarin de rotatie van de wervel tegengesteld is aan die in de lijwervel. Bij scheve wind is die sublijwervel er niet. Metingen in en achter de lijwervel op afstand van 10 H; B/H = 2 tot 22; L/H = 1;  $z_0 = 0.4$  mm. Figuur 8, gebouwtype E.

De metingen van Fackrell (1981) spelen een rol bij de bepaling van de hoogte van de lijwervelpuim in de module.

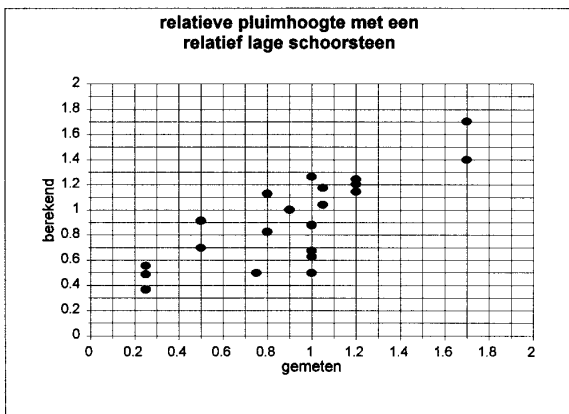
Anderen, geciteerd in Meroney (1982), zijn mogelijk in de toekomst te gebruiken.

## 9.2 Andere metingen

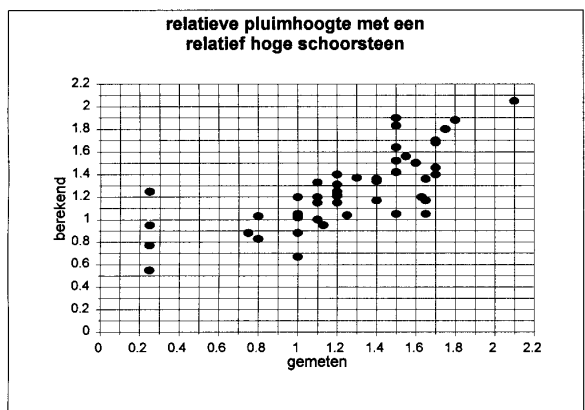
Daarnaast zijn er nog andere windtunnelproeven waaraan getoetst is zoals die gerapporteerd door Roberts (1994) met  $\sigma$ 's en concentratie van een grondbron met een diameter van 10 m en van 0.1 m in de windtunnel met diverse ruwheden. De resultaten hiervan waren bevredigend. Als de Lagrangiaanse tijdschaal van de wind ook gemeten is, kan de concentratie berekend worden. Door Davidson (1994) is een correlatie gegeven voor een warme pluim, welke beter is dan die van Briggs. Deze is in de module ingebouwd.



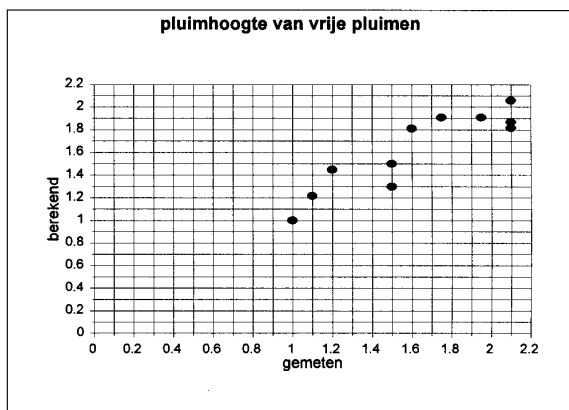
Figuur 9a



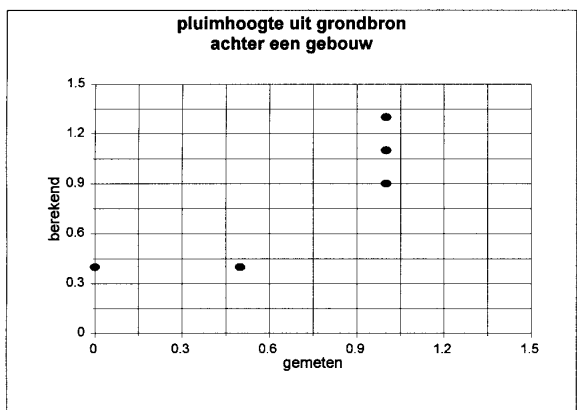
Figuur 9b



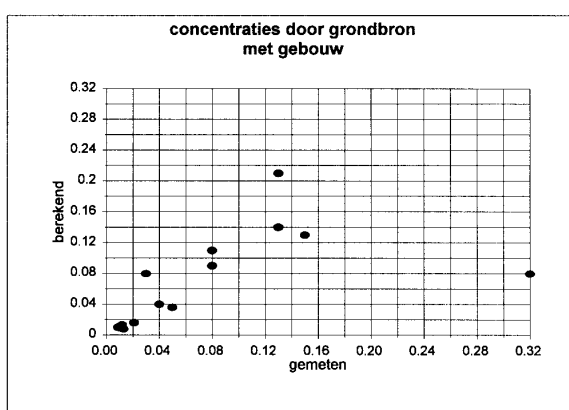
Figuur 9c



Figuur 9d



Figuur 9e



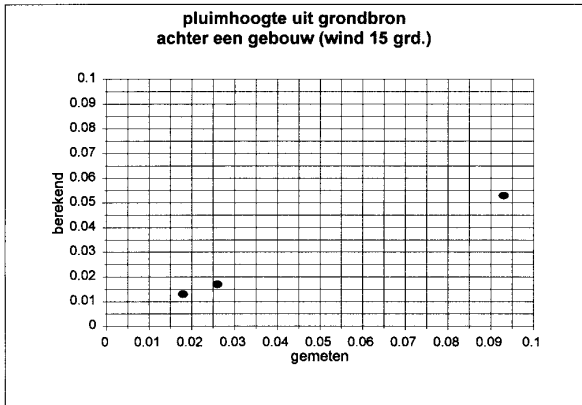
Figuur 9f

Figuur 9 Vergelijkingen tussen metingen en berekeningen

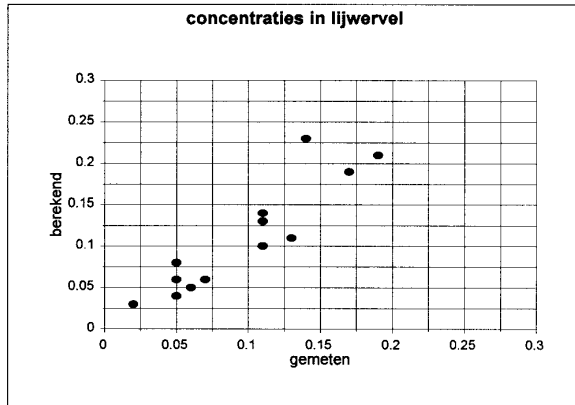
## 10. Vergelijking metingen en berekeningen

De resultaten van de vergelijkingen tussen de rekenmodule en verschillende windtunnelproeven zijn in Figuur 9 en Figuur 10 weergegeven. De toelichtingen op de vergelijkingen worden hieronder gegeven. In de figuren zijn pluimhoogten dan wel concentraties gegeven. In beide gevallen geven de figuren steeds genormeerde waarden aan. Concentraties zijn daarbij uitgedrukt in procenten van de aanvangsconcentratie (in de pijp) en de gemeten/berekende hoogten zijn gedeeld door de gebouwhoogte.

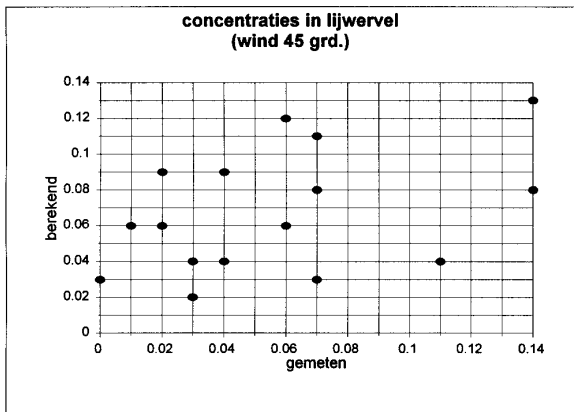
- In Figuur 9a wordt de vergelijking tussen de concentraties voorbij de lijwervelgrens (ver weg achter een gebouw) onder een pluim (Huber en Snyder, 1982; Schulman en Scire, 1991; Van Melle en Baars, 1985; Robins en Castro, 1977). De wind is zowel loodrecht op de voorwand als onder 45 grad. De concentraties achter de grens van de lijwervel worden op de grond en op pluimashoogte berekend uit de bijdragen van de pluim uit de pijp en van de pluim uit de lijwervel. Ook als er geen gebouwinvloed is wordt deze sommatie gemaakt met een bronsterkte nul in de lijwervel.
- Uit literatuuronderzoek zijn vier meetseries gevonden waarin de hoogte van de pluimas gegeven is of uit figuren nagemeten kan worden (Huber en Snyder, 1982; Snyder en Lawson, 1976; Van Melle en Baars, 1985; Robins en Castro, 1977). In de module wordt de hoogte van de scheidingsstroomlijn boven de dak- en lijwervel en het zog berekend, nadat de afmetingen van die wervels en het zog zijn uitgerekend. Als de emissie zonder impuls vrijkomt op de scheidingsstroomlijn zal de pluim de scheidingsstroomlijn volgen. De zo verkregen relatieve pluimhoogte met een relatief lage schoorsteen zijn onderling vergeleken. Zie Figuur 9b. Hierbij kan de baan getoetst worden aan metingen van emissies die vrijwel op de scheidings-stroomlijn beginnen. Het betreft hier emissies die op dakhoogte beginnen of die door een impuls stijgen.
- In Figuur 9c zijn relatieve pluimhoogte met een relatief hoge schoorsteen vergeleken. Een stap verder is de berekening van een pluim die boven de scheidingsstroomlijn uitkomt. Daar moet de afzwakking van de invloed van de scheidingsstroomlijn op de stroomlijn berekend worden (Huber en Snyder, 1983; Van Melle en Baars, 1985).
- Figuur 9d geeft de pluimhoogte van vrije pluimen uit vrijstaande pijpen. Deze zijn berekend voor die proeven waarbij metingen beschikbaar zijn (Huber en Snyder, 1983; Van Melle en Baars, 1985; Robins en Castro, 1977).
- Vervolgens Figuur 9e met de pluimhoogte uit een grondbron achter een gebouw. De metingen zijn meestal van mindere kwaliteit doordat de pluim zo dik is en het maximum niet duidelijk zichtbaar is (Huber en Snyder, 1982; Robins en Castro, 1977; Huber, 1989; Roberts, Fryer-Taylor en Hall, 1994).



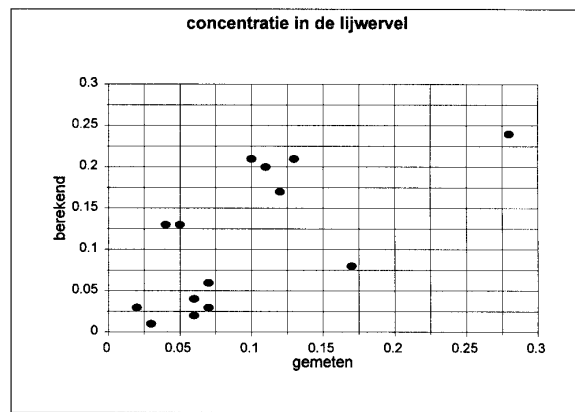
Figuur 10a



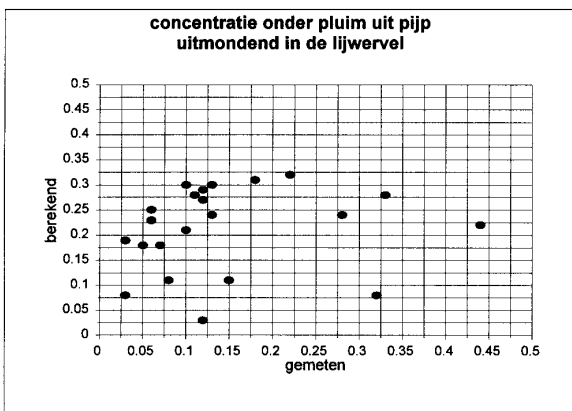
Figuur 10b



Figuur 10c



Figuur 10d



Figuur 10e

Figuur 10 Vervolg van de vergelijkingen tussen metingen en berekeningen



- Figuur 9f betreft concentraties door een grondbron met gebouw. Bij metingen (Huber en Snyder, 1982; Robins en Castro, 1977; Huber, 1989) is de gemeten concentratie vier maal zo groot als de berekende. De verklaring hiervoor is dat de emissie uitmondt in de sub-lijwervel waarin de verversing met lucht veel kleiner is dan in de grote lijwervel. Bij de berekening van de concentratie is het een probleem om de transportsnelheid te kiezen; immers op welke hoogte dient de windsnelheid berekend te worden? In navolging van het (oude) Nationale Model is gekozen voor een transporthoogte van 10 m (in de windtunnel is dit geschaald). In de toekomst kan overwogen worden om te kiezen voor de hoogte van het zwaartepunt van de pluim (zie bijvoorbeeld Roberts, 1994).
- Als aanvulling hierop is in Figuur 10a ook nog de pluimhoogte uit een grondbron achter een gebouw met een aanstroming van de wind onder 15 grd uitgezet (Huber en Snyder, 1982; Robins en Castro, 1977; Huber, 1989; Roberts, Fryer-Taylor en Hall, 1994).
- In Figuur 10b worden de concentraties in de lijwervel ook vergeleken met metingen. De metingen zijn recht onder de pluim uitgevoerd op een afstand binnen ongeveer 3/4 van de lijwervellengte. Verschillen in concentraties zijn te verklaren door een cirkelvormige baan van de pluimen. In de berekeningen is de fractie genomen van de emissie die opgenomen is in de lijwervel. De wind is loodrecht op de voorwand (Schulman en Scire, 1993).
- In Figuur 10c zijn de concentraties in de lijwervel met een aanstroming van de wind onder 45 grd uitgezet (Schulman en Scire, 1993).
- In Figuur 10d zijn de concentraties in de lijwervel met een aanstroming van de wind loodrecht op de voorwand uitgezet (Schulman en Scire, 1993).
- Ten slotte geeft Figuur 10e resultaten van concentratie onder een pluim uit de pijp uitmondend in de lijwervel (Van Melle en Baars, 1985; Robins en Castro, 1977).



## 11. Vergelijkende berekeningen met de methode uit 1986

Aandachtspunten bij koppeling van de module aan een lange-termijnmodel zijn reeds in paragraaf 8.3 besproken. Door inbouw van de module in “STACKS” is het mogelijk een vergelijking te maken tussen toepassing van de aanbeveling uit 1986 en de nu voorliggende methode. “STACKS” is de KEMA-computercode van het nieuwe Nationaal Model.

Allereerst is een opmerking van algemene aard hierbij op zijn plaats.

Men zou verwachten dat het effect van de aanwezigheid van een gebouw op de rookpluimverspreiding op grote afstand (bijvoorbeeld 25 km of meer) minimaal wordt of zelfs nihil is. Bij de oude aanbeveling, toegepast in het oude Nationaal Model, was dit inderdaad het geval. Echter, door de verlaging van de minimale grenslaaghoogte tot 50 m en door de sterkere hoogteafhankelijkheid van de turbulentie (en dus dispersie), is dit bij de nieuwe aanbeveling niet meer het geval. Bij ongestoorde verspreiding kan een bepaalde pluimfractie een geringe inversiehoogte overstijgen en dus onttrekken aan de verspreiding binnen de menglaag. Door de pluimdaling door gebouwinvloed zal een grotere fractie binnen de grenslaag blijven. Bovendien zal transport op een lagere hoogte leiden tot minder dispersie. Deze twee effecten tezamen leiden tot hogere grondconcentraties op grote afstanden van de bron (modelmatig gezien), wanneer sprake is van gebouwinvloed. Dit geldt dus voor zowel de voorliggende methode als voor de methode uit 1986.

Een punt dat de oude methode betreft, is de wijze waarop men de gebouwcoëfficiënt (K-factor) in een lange-termijnmodel inbouwt. De oude methode (1986) was voornamelijk gericht op toepassing in een lange-termijnmodel, waarbij de meteorologie geïnclassificeerd is en daarmee ook de windrichting. In de nieuwe aanbevelingen voor het Nationaal Model (die in STACKS zijn toegepast) echter worden de meteorologie en de dispersie per uur doorgerekend. Er is aangenomen dat het de beste keus is om de K-factoren voor uurgemiddelde berekeningen toe te passen. Voor een geïnclassificeerde methode wordt steeds een K-factor van 1 aanbevolen; dit kan ertoe leiden dat de uur-voor-uur methode en de geïnclassificeerde (oude) methode niet geheel met elkaar consistent zijn. In de voorbeeldberekeningen zijn de aanbevelingen voor uurberekeningen gevolgd, inclusief de K-factoren voor diverse gebouw-geometrieën en windrichtingen.

### Andere algemene opmerkingen

Wanneer een bron op een relatief klein gebouw (schoorsteenhoogte meer dan twee keer de gebouwhoogte) staat, zijn de berekende concentraties rond de bron ongeveer hetzelfde als voor een vrijstaande schoorsteen. Op grote afstanden van de bron benaderen de berekende concentraties weer de waarden voor een vrijstaande bron.

Aangezien de aanbeveling uit 1986 bedoeld is voor kubusvormige gebouwen met de positie van de schoorsteen in het midden van het dak, zijn enkele voorbeelden met dezelfde kenmerken doorgerkend. Deze zijn opgenomen in Tabel 3.

Tabel 3 Bronparameters, gebruikt voor de vergelijking tussen oude en nieuwe methode voor berekening van gebouwinvloed

codering	bron (L,B,H)	schoorsteenhoogte schoorsteendiameter	volumestroom (m <sup>3</sup> /s)	warmteemissie (MW)
kubus, Hs= 55	kubusvormig 50x50x50 m	55 1	5	0
kubus, Hs=60	kubusvormig 50x50x50 m	60 1	5	0
rechthoek, liggend, matige impuls	rechthoekig liggend (50,25,25)	55 1	15	0
rechthoek, liggend, matige impuls	rechthoekig, liggend (50,25,25)	55 1	15	0
kubus, Hs=70	kubusvormig 50x50x50 m	70 1	5	0
kubus, Hs=100	kubusvormig 50x50x50 m	100 1	5	0
rechthoek, liggend, weinig impuls	rechthoekig liggend (50,25,25)	55 1	5	0
rechthoek, liggend, matige impuls	rechthoekig liggend (50,25,25)	55 1	15	0
rechthoek, liggend, veel impuls	rechthoekig liggend(50,25,25)	55 1	25	0
toren, 0 MW	rechthoekig staand (25,25,50)	55 1	5	0
toren 1 MW	rechthoekig staand (25,25,50)	55 1	5	1
toren, 3 MW	rechthoekig staand (25,25,50)	55 2	5	3
plat gebouw, Hs=26	rechthoekig plat (50,50,25)	26 1	5	0
plat gebouw, Hs=40	rechthoekig plat (50,50,25)	40 1	5	0

**Overige kenmerken voor de berekeningen:**

- meteorologie van Schiphol voor het jaar 1994
- terreinruwheid: 20 cm
- emissie: inert gas
- geen depositie in rekening gebracht
- receptorpunten op een lijn in noordoostelijke richting vanaf de bron (dus min of meer over de lijn van de meest voorkomende windrichting)
- oriëntatie van het gebouw: 45 graden.

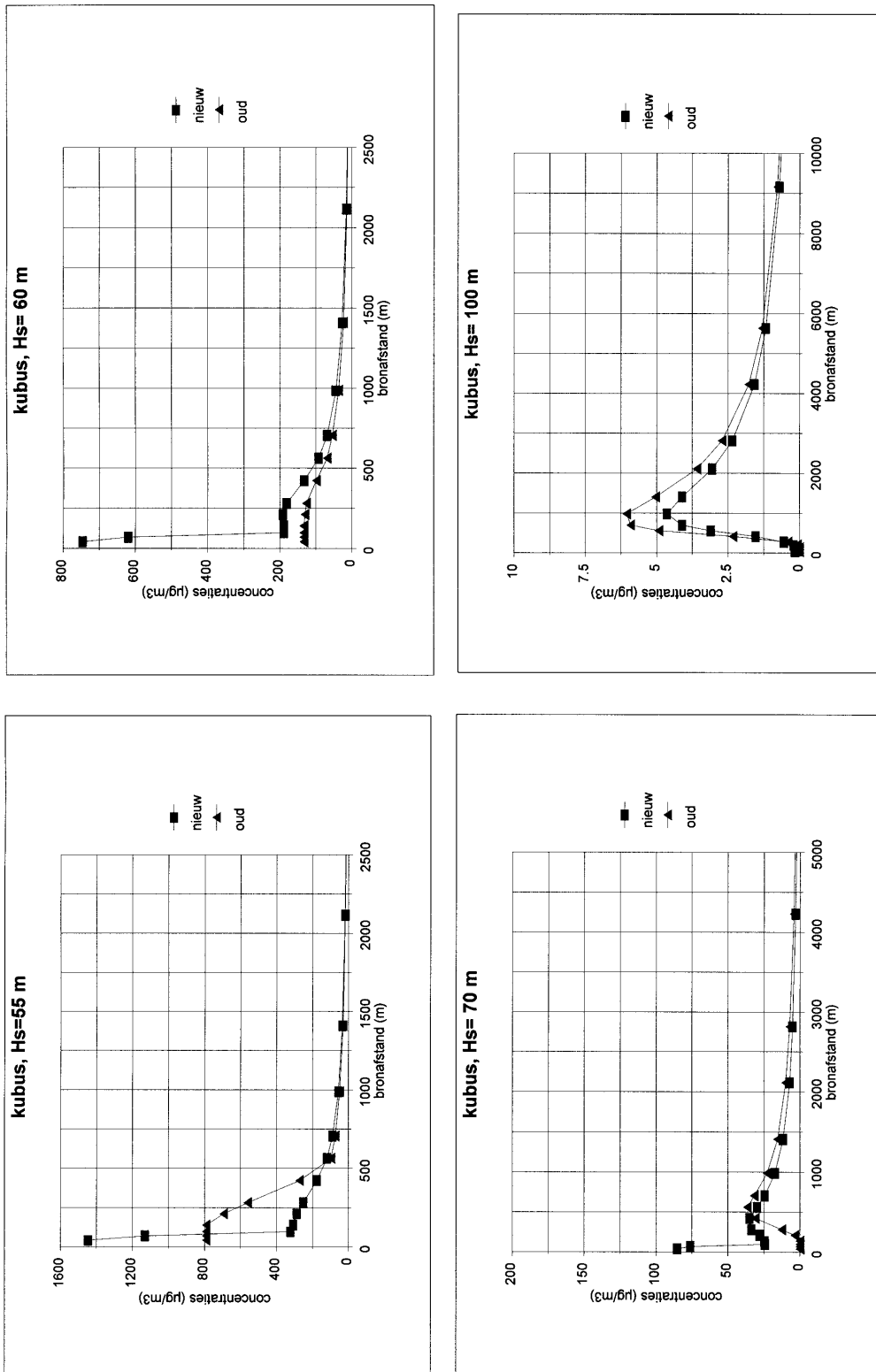
De berekende concentraties zijn per bron steeds in x-y plots gegeven (zie Figuur 11).

Ten opzichte van de oude methode zijn de lijwervelconcentraties doorgaans hoger. Dat wordt voornamelijk veroorzaakt door twee aspecten: de eerder gebruikte windtunneldata en de gehanteerde fysische beschrijving in de methode van 1986. De eerder gebruikte windtunneldata zijn achteraf gebleken verkeerd te zijn gedocumenteerd: gedacht werd dat de geëmitteerde pluim geheel in de lijwervel verdween, maar in werkelijkheid was dat niet zo. Ten tweede bevatte de modelbeschrijving niet de juiste fysica: de lijwervelconcentratie werd berekend met  $Q/(K.A.u)$ ; het effectieve aanstromingsoppervlak  $A$  heeft echter niet zo veel te maken met de lijwervelconcentraties, de huidige formulering is een verbetering.

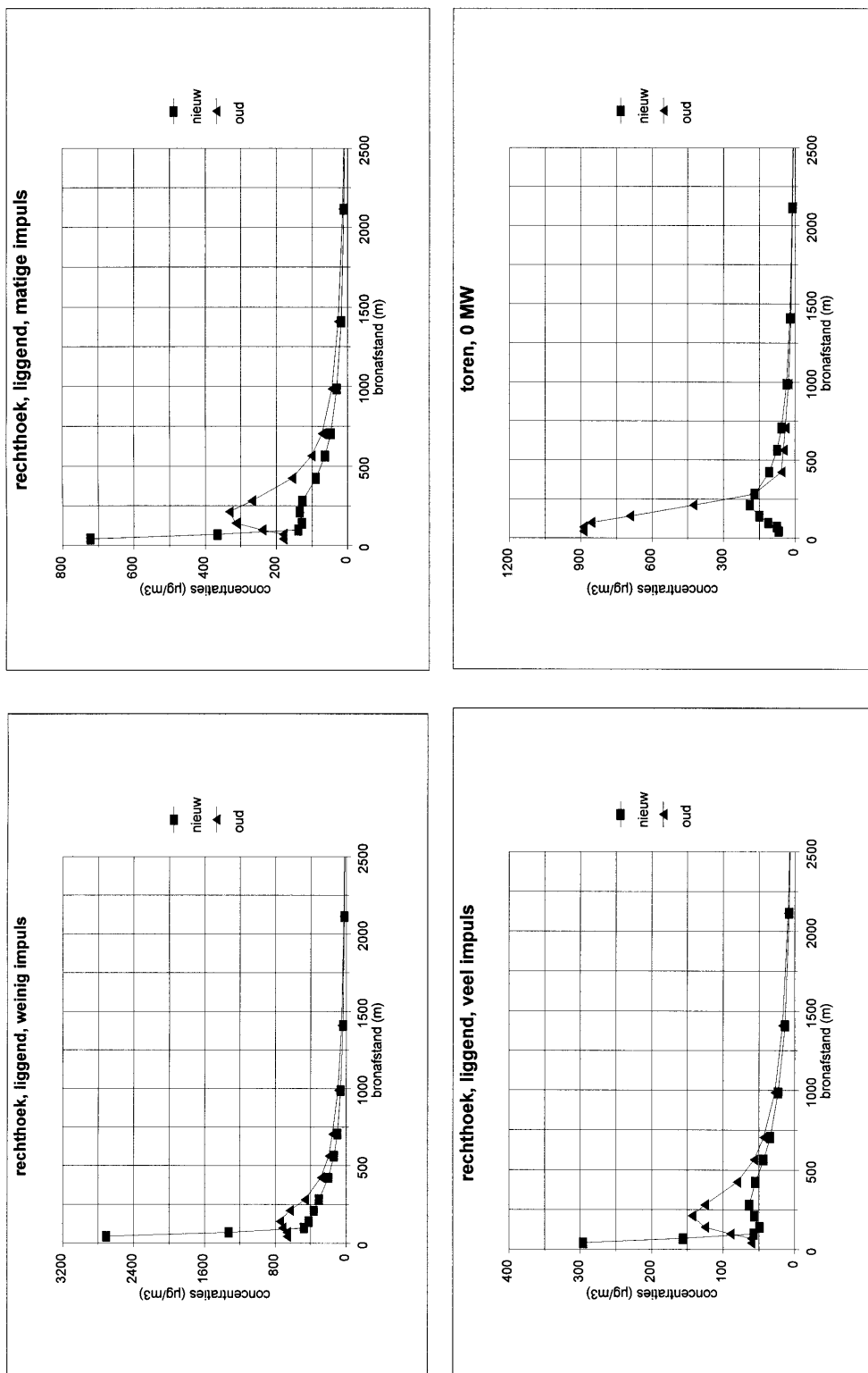
Voor gebouwen van het “toren” type echter is het effect van de lijwervelbeschrijving in de nieuwe methode zichtbaar, de lijwervel kan dan immers min of meer los van de grond staan. De lijwervelconcentraties zijn dan juist lager, hetgeen logisch is. De concentraties direct achter de lijwervel zijn lager volgens de nieuwe methode.

In de nieuwe methode is het effect van twee pluimen eveneens zichtbaar: na de hoge lijwervelconcentraties treedt een tweede maximum op.

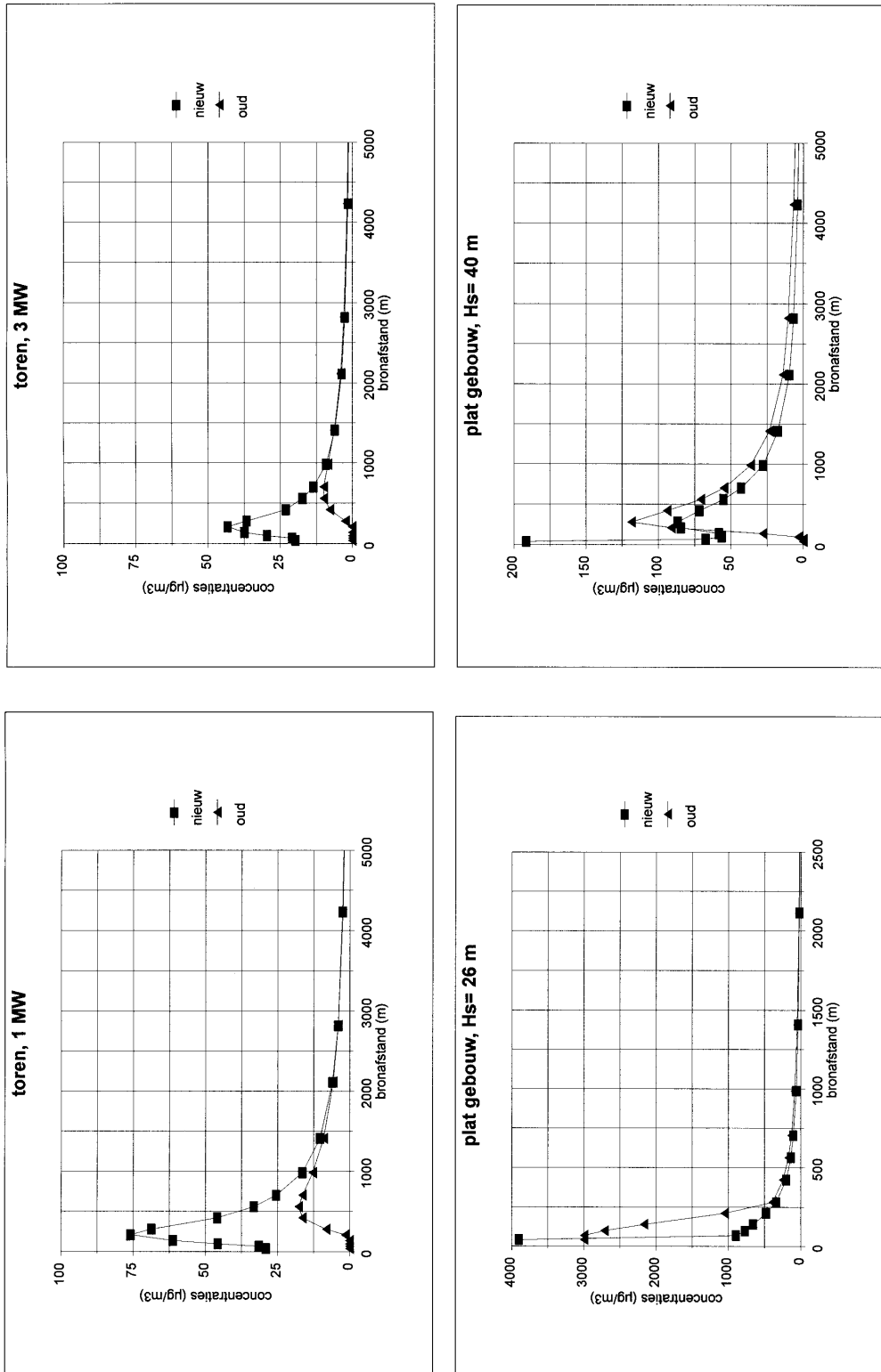
Voor de relatief hoge schoorsteen van 100 m, geplaatst op de kubus geven beide methoden vergelijkbare resultaten; hier wordt de situatie van een vrijstaande schoorsteen benaderd: er is dus sprake van consistent rekengedrag.



Figuur 11a Berekende jaargemiddelde concentraties als functie van bronaafstand, berekend volgens de hier gepresenteerde methode, vergeleken met de oude methode (1986)



Figuur 11b Berekende jaargemiddelde concentraties als functie van bronafstand, berekend volgens de hier gepresenteerde methode, vergeleken met de oude methode (1986).



Figuur 11c Berekende jaargemiddelde concentraties als functie van bronafstand, berekend volgens de hier gepresenteerde methode, vergeleken met de oude methode (1986)



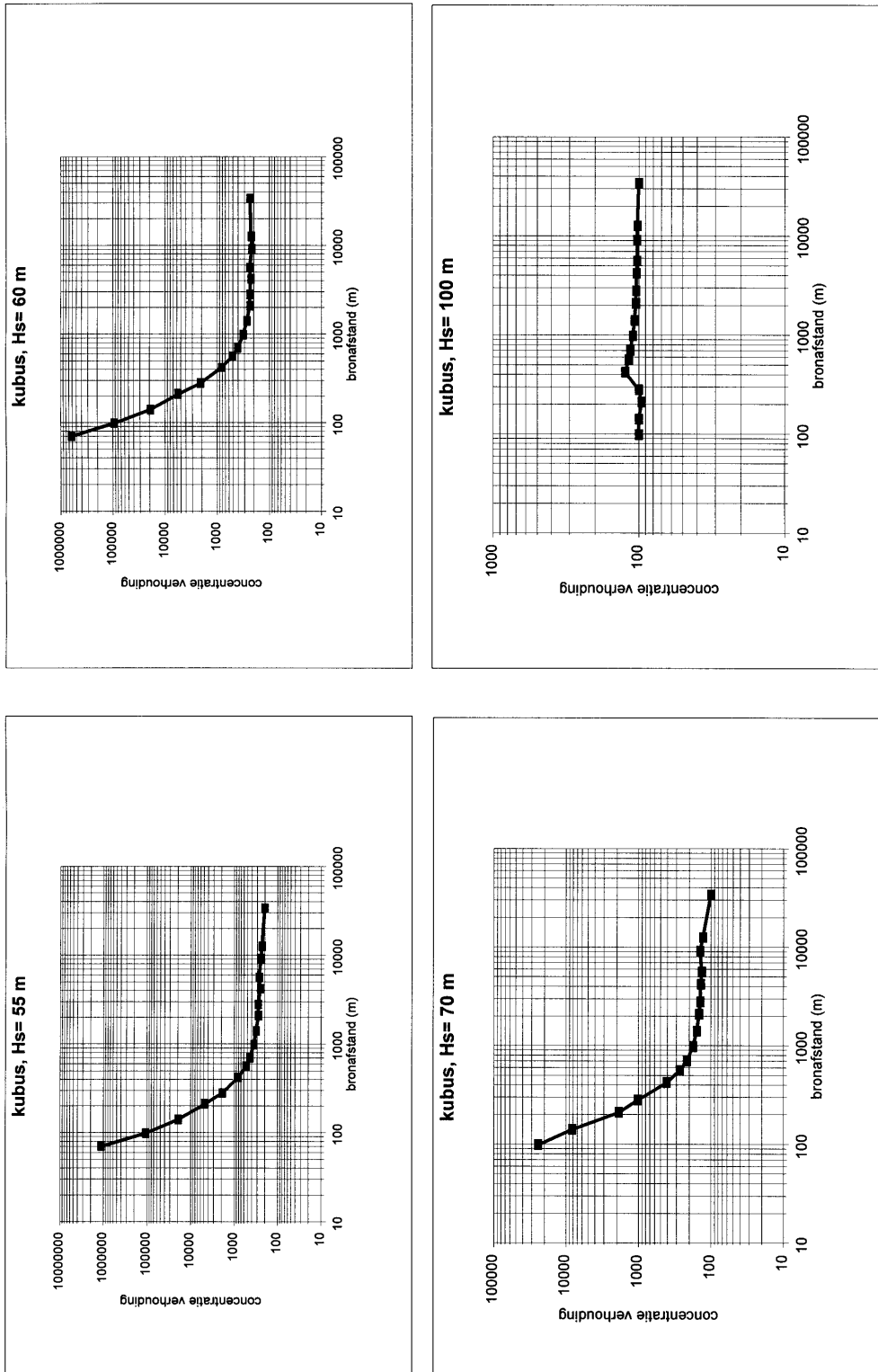
## 12. Afstandsafhankelijkheid van het gebouweffect

Om een indruk te geven tot op welke afstanden de gebouwinvloed nog een significant effect heeft, wordt het effect van de gebouwinvloed als functie van de afstand geplot. In deze plots zijn de berekende grondconcentraties met gebouwinvloed gedeeld door de berekende grondconcentraties zonder gebouwinvloed, dus bij ongestoorde dispersie. Dezelfde twaalf bron-situaties als in het voorgaande hoofdstuk beschreven zijn doorgerekend. De resultaten zijn gegeven in Figuur 12, Figuur 13 en Figuur 14.

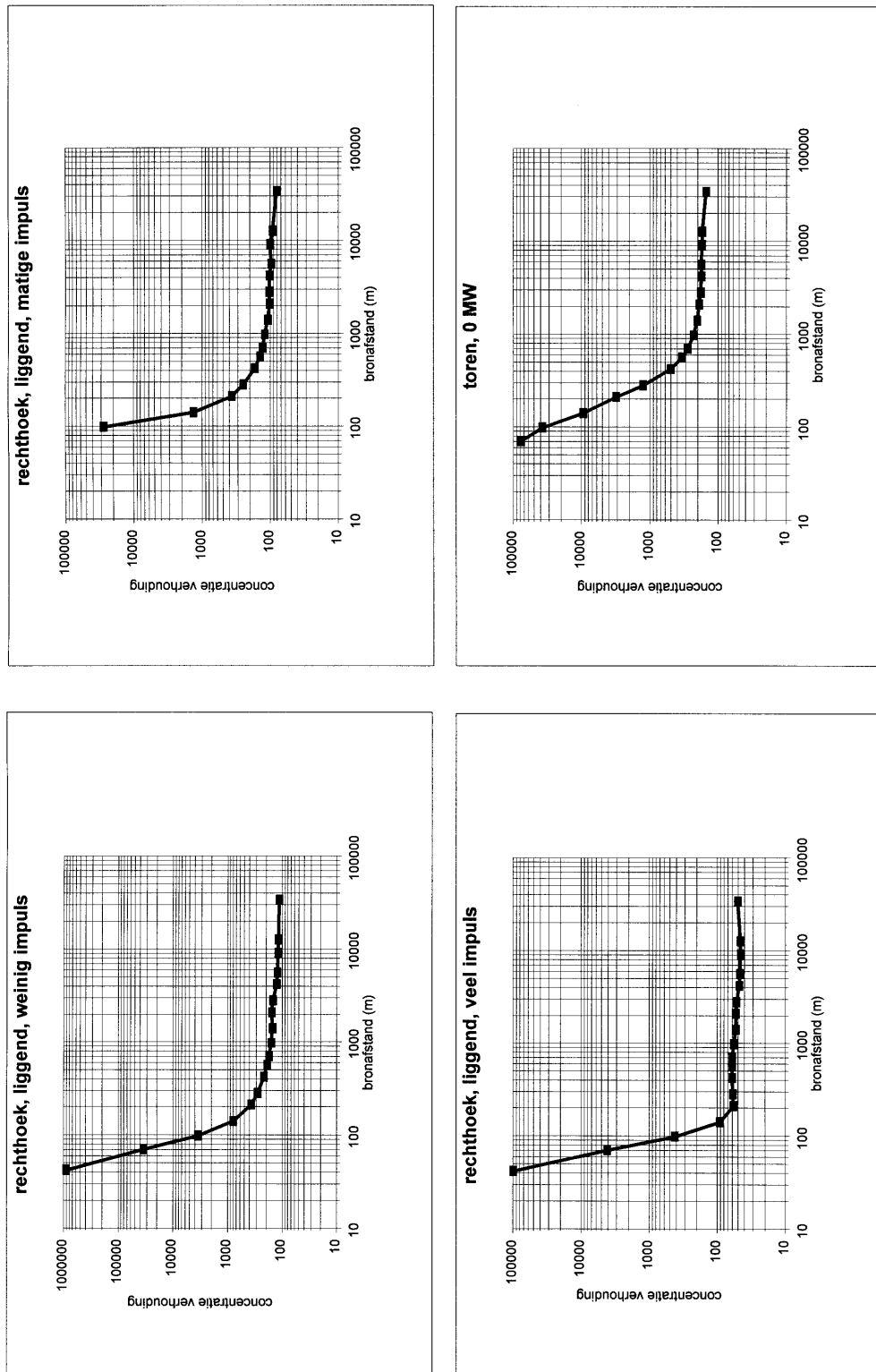
De gebouwinvloed is merkbaar tot ruwweg afstanden van 1 à 3 km. Men realiseert zich dat dit slechts een impressie geeft voor de doorgerekende gebouwsituaties; voor lagere gebouw-schoorsteencombinaties is het effect beperkt tot kleinere afstanden; voor grotere gebouwen zal het effect tot op wat grotere afstanden merkbaar zijn. Zichtbaar is dat het gebouw in sommige gevallen als functie van de afstand een blijvend effect heeft. Bij bron-gebouwcombinaties 1-3 zijn de grondconcentraties op kilometers afstand nog steeds een factor twee hoger wanneer geëmitteerd vanaf een gebouw dan uit een vrijstaande schoorsteen. De verklaring is gelegen in het vermelde feit dat de pluimhoogte door het gebouw wordt verlaagd tot hoogten binnen de grenslaag van 50 m hoog. Modelmatig wordt een veraf gelegen receptorpunt vaker beïnvloed door de pluim; de absolute concentraties zijn natuurlijk erg laag.

Voor de bron met een duidelijke impuls (situatie 7) blijkt de nieuwe formulering van de impulsstijging tot hogere pluimhoogten te leiden dan volgens de oude formulering uit een vrijstaande schoorsteen. Zoals te zien is, zijn de jaargemiddelde concentraties daardoor een factor 2 lager. De oude formulering was op dit punt conservatief; de nieuwe formulering in deze gebouwmodule zou ook voor vrijstaande schoorstenen kunnen worden toegepast. In het nieuwe Nationaal Model is dit gedeeltelijk overgenomen.

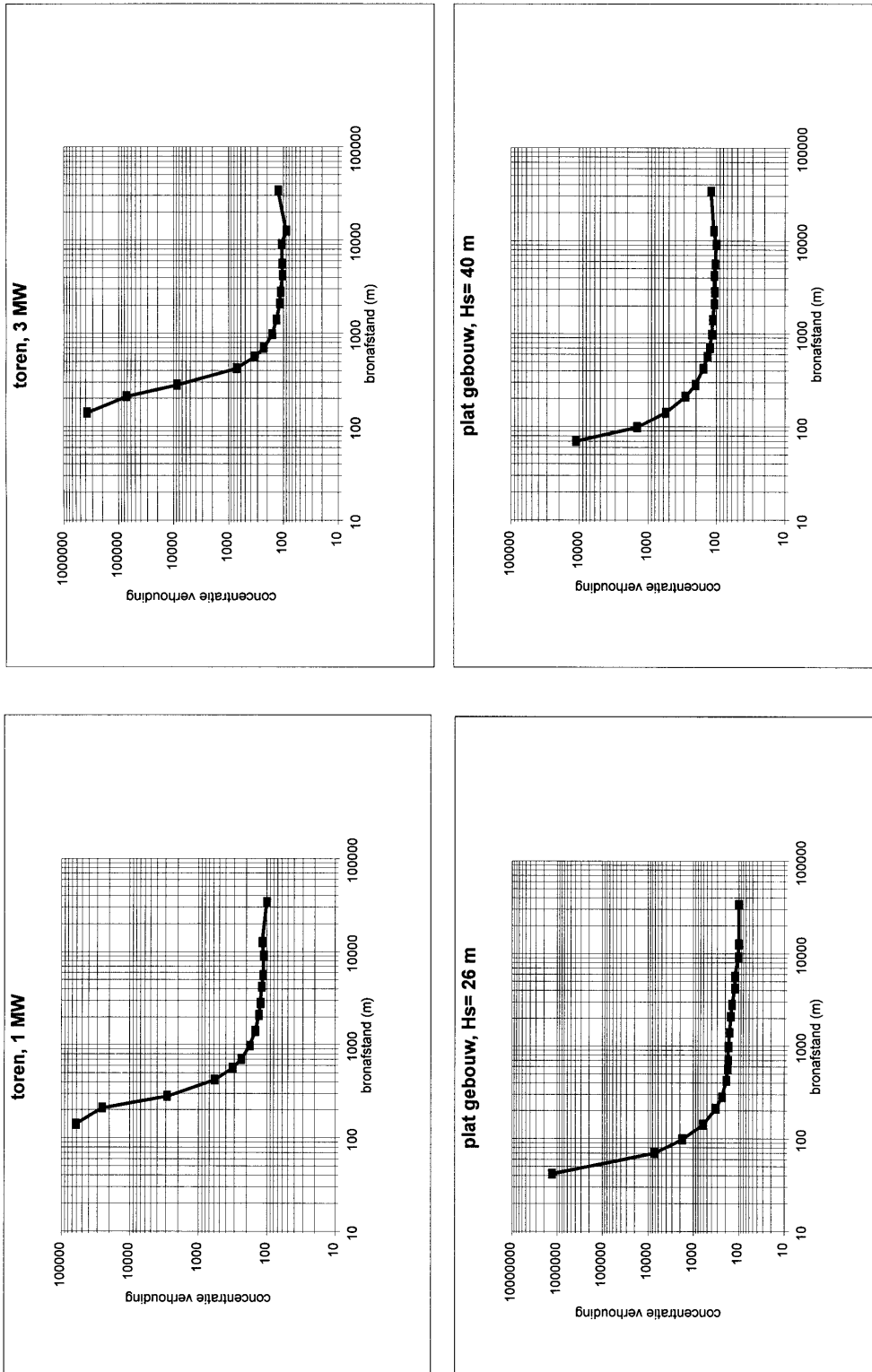
In de overige gevallen geven de berekeningen met en zonder gebouwinvloed op grote afstanden ruwweg dezelfde berekeningsresultaten. Na 1 km is doorgaans het effect van het gebouw (50 of 25 m hoog) op grondconcentraties binnen een factor 2 gedaald.



Figuur 12 Illustratie van de afstandsafhankelijkheid van het gebouweffect: de verhouding van berekende grondconcentraties met gebouwinvloed en berekende grondconcentraties zonder gebouwinvloed (voor 6 bron-gebouwcombinaties uit Tabel 3; uitgedrukt in procenten)



Figuur 13 Illustratie van de afstandsafhankelijkheid van het gebouweffect: de verhouding van berekende grondconcentraties met gebouwinvloed en berekende grondconcentraties zonder gebouwinvloed (voor 6 bron-gebouwcombinaties uit Tabel 3; uitgedrukt in procenten)



Figuur 14 Illustratie van de afstandsafhankelijkheid van het gebouweffect: de verhouding van berekende grondconcentraties met gebouwinvloed en berekende grondconcentraties zonder gebouwinvloed (voor 6 bron-gebouwcombinaties uit Tabel 3; uitgedrukt in procenten)

## 13. Discussies

Er is een consistente module gemaakt waarmee pluimbanen en concentraties berekend kunnen worden van emissies onder invloed van een windstroming over een gebouw. Hiermee is een breed scala van gemeten gevallen nagerekend, met goede overeenkomst tussen metingen en modelberekeningen.

De module is ontworpen voor gebouwen met scherpe randen, waaraan de stroming loslaat. Daarom is de module niet zonder meer geschikt voor ronde of gestroomlijnde gebouwen. In die gevallen kan de lengte van de dakwervel met een in te vullen factor verminderd worden.

De module is ontworpen om de baan van een pluim boven het midden van het gebouw te berekenen. Daarom is de uitkomst fout als de emissie-afvoer aan de zijkant van het gebouw staat. De reden is dat er een kurkentrekkervormige stroming aan de zijkanten van het dak begint die de emissie tot laag bij de grond kan voeren.

In de module wordt niet de laterale verplaatsing van de pluim berekend als het gebouw scheef aangestroomd wordt. De plaats van de berekening wordt alleen in de lengterichting opgegeven. In werkelijkheid echter wordt de pluim door het gebouw opzij geleid. Aan verbetering van berekening van de zijdelingse positie is pas behoefte als er op meerdere punten in het veld concentraties berekend moeten worden.

Een aantal gekozen oplossingen zijn wezenlijk anders dan het model van 1986. Als eerste punt is bij vrijstaande pijpen gekozen om onderscheid te maken tussen drie gebieden (namelijk in de lijwervel, boven de lijwervel en achter de lijwervel). Een tweede punt is om de directe pluim en een eventuele pluim uit de lijwervel te onderkennen. De som van allebei de bijdragen aan de concentratie wordt uitgerekend. Een derde punt is om de verspreiding in de pluim te beschrijven met de Taylor-vergelijking voor de dispersie, zoals nu gebruikelijk is in het Nieuwe Nationaal Model. Deze houdt rekening met de schaling van de "Lagrangiaanse tijdschaal" en de "turbulentie-intensiteit". Het geeft in de windtunnel goede resultaten op alle afstanden, in alle gemeten vrije pluimen en is onontbeerlijk bij de schaling van windtunnelproeven.



## 14. Referenties

- ANONYMOUS, 1984. "N.M." "Models for the calculation of the dispersion of airborne emissions, including recommendations for the values of the parameter for the long term model". 1986 "New recommendations", report TNO-SCMO, September 1984 (in Dutch).
- ANONYMOUS, 1986. "N.M.+" "Influence of a building on the dispersion of plumes from a stack", report TNO-SCMO, October 1986 (in Dutch).
- BRIGGS, G.A., 1984. Plume rise and buoyancy effects. Chapter 8 in "Atmospheric science and power production" DE84005177 (DOE/TIC-27601), National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield, Virginia 22161.
- DAVIDSON, G.A., 1994. Dimensionless correlations for buoyant plume behaviour in crossflows and scaling criteria for physical modelling of dispersion processes. In: Journal of wind engineering and Industrial Aerodynamics, 51 (1994), pp. 135-155.
- ERBRINK, J.J., 1995. Turbulent Diffusion from Tall Stacks. The use of advanced boundary-layer meteorological parameters in the gaussian dispersion model "STACKS", Ph.D. Thesis, Free University, Amsterdam, April 1995, 228 pp.
- FACKRELL, J.E., 1981. An examination of simple models for building influenced dispersion, CEGB Research Division RD/M/1194N81.
- FACKRELL, J.E., and PEARCE, J.E., 1981. Parameter affecting dispersion in the near wake of buildings, CEGB Research Division RD/M/1179N81.
- HOSKER, R.P. Jr., 1979. Empirical estimation of wake cavity size behind block-type structures. In: Proceedings Fourth Symp. on Turbulence, Diffusion and Air pollution. 15-18 January 1979, Reno, Nevada, Am. Met. Soc., pp. 603-609.
- HUBER, A.H., 1989. The influence of building width and orientation on plume dispersion in the wake of a building. In: Atm. Env., Vol. 23 No. 10, pp. 2109-2116.
- HUBER, A.H., and SNYDER, W.H., 1982. Wind tunnel investigation of the effects of a rectangular shaped building on dispersion of effluent from short adjacent stacks. In: Atm. Env., 12, pp. 2837-2848.
- JACOBS, A., 1984. The flow around a thin closed fence. In: Boundary-Layer Met., 28 (1984), pp. 317-328.
- MELLE, A. VAN, and BAARS, H.P., 1985. Influence of a building on the dispersion of plumes from a stack, report TNO-CMP 85/08, September 1985 (in Dutch).
- MELLE, A. VAN, 1993. Description of a model on the Influence of wide and slender buildings on the dispersion of plumes from a stack, report TNO-ME 93-302, August 1993 (in Dutch).
- MELLE, A. VAN, 1995. Model voor de berekening van concentraties onder rookpluimen beïnvloed door een breed of smal gebouw, KEMA-rapport nr. 64199-KES/MLU 95-3202.
- MERONEY, R.N., 1982. Turbulent diffusion near buildings. Chapter 11 in "Engineering Meteorology", editor Plate, E.J., 1982, Elsevier.

- PASQUILL, F. and SMITH, F.B. "Atmospheric Diffusion" third ed., Ellis Horwood Series in Environmental Science.
- ROBERTS, P.T., FRYER-TAYLOR, R.E.J., and HALL, D.J., 1994. Wind-tunnel studies of roughness effects in gas dispersion. In: *Atm. Env.*, Vol. 28, No. 11, pp. 1861-1870.
- ROBINS, A.G., and CASTRO, 1977. A wind tunnel investigation of plume dispersion in the vicinity of a surface mounted cube I. The flow field, pp. 291-297, and II. The concentration field. In: *Atm. Env.*, Vol. 11, pp. 299-311.
- SCHLICHTING, H., 1968. "Boundary-Layer Theory", McGraw-Hill Book Company.
- SCHULMAN, L.L., and SCIRE, J.S., 1993. Building down-wash screening modelling for the downwind recirculation cavity. In: *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 43, pp. 1122-1127.
- SCHULMAN, L.L., and SCIRE, J.S., 1991. The effect of stack height, exhaust speed, and wind direction on concentrations from a rooftop stack. In: *ASHRAE Transactions* 97(2):573.
- SHELL, 1994. User's Manual HGSYSTEM 3.0 by L. Post. Shell Research Thornton.
- STREETER, V.L. 1961. "Handbook of Fluid Dynamics", chapter 4 Ideal-fluid flow, McGraw-Hill Book Company.
- SNYDER, W.H., and LAWSON, R.E., 1976. Determination of a necessary height for a stack close to a building - a wind tunnel study. In: *Atm. Env.*, Vol. 10, pp. 683-691.
- SNYDER, W.H., and LAWSON, R.E., 1991. Fluid modelling simulation of stack-tip down-wash for neutrally buoyant plumes. In: *Atm. Env.*, Vol. 25A, No. 12, pp. 2837-2850.
- TAYLOR, G.I., 1921. Diffusion by continuous movements. In: *Proc. London Math. Soc.*, 20, pp. 196-202.
- THOMPSON, R.S., 1993. Building amplification factors for sources near buildings: a wind-tunnel study. In: *Atm. Env.*, Vol. 27A, No. 15, pp. 2313-2325.
- WILSON, D.J., 1979. Flow patterns over flat-roofed buildings and application to exhaust stack design. In: *ASHRAE Transactions* 85(2):284 (1979), pp. 284-295.