

by

O.L. Fourie* en J.C. Venter

Afdeling Atmosferiese Wetenskappe, NFNL, WNNR, Posbus 395, Pretoria, 0001

SAMEVATTING

Die styging wat 'n warm pluim ondergaan, hang volgens die sogenaamde Briggs-model af van die weerparameters windspoed, potensieletemperatuurgradiënt en omgewingstemperatuur, asook van die skoorsteenparameters losgastemperatuur (E. "off-gas temperature") en losgasvolumevloeiempo. In hierdie studie is hierdie afhanklikheid ondersoek. Daar word ook getoon hoe veranderings in pluimstyging maklik bereken kan word vir veranderings in omgewings- en losgastemperature en volumevloeiempo. Die resultate kan gebruik word om verskillende opsies ten opsigte van nywerheidsvestiging en nywerheidsprosesse onderling op te weeg sover dit die invloed van pluimstyging op luggehalte betref.

ABSTRACT

The rise undergone by a hot plume depends according to the so-called Briggs model on the meteorological parameters wind speed, potential temperature gradient and ambient temperature, as well as on the stack parameters off-gas temperature and volume flow rate. This dependence was investigated in this study. It is also shown how changes in plume rise resulting from changes in ambient and off-gas temperatures and volume flow rate can easily be calculated. The results can be used to compare different options as regards plant location and industrial process insofar as the influence of plume rise on air quality is concerned.

INLEIDING

In die geval van nuwe besoedelende nywerhede is dit belangrik om 'n *a priori* raming te maak van die invloed wat dit op die luggehalte van die omgewing sal hê. In bestaande diffusiemodelle wat gebruik word om sodanige afskattings te maak, is die finale hoogte wat die pluim bokant die grond bereik 'n belangrike toevoerparameter. Sonder om op die teorie van diffusiemodelle in te gaan, is dit intuïtief duidelik dat, in die algemeen en alle ander faktore gelyk synde, die konsentrasie op grondvlak sal afneem soos die finale pluimhoogte toeneem.

Die finale pluimhoogte, wat gewoonlik bekend staan as die effektiëwe skoorsteenhoogte, is die som van die fisiese skoorsteenhoogte en die styging wat die pluim ondergaan nadat dit in die atmosfeer vrygelaat is. Om 'n toelaatbare grondvlakkonsentrasie te verseker kan 'n baie hoë skoorsteen gebou word. Koste is egter 'n baie belangrike faktor in die konstruksie van hoë skoorstene en daarom is dit verkieslik dat toestande geoptimeer word om 'n genoegsame pluimstyging te verkry. Die totale pluimstyging hang van sowel weerkundige as skoorsteenparameters af. Uit die aard van die saak kan die heersende klimaat van 'n lokaliteit nie verander word nie, maar met 'n kennis van die invloed van weerparameters op pluimstyging kan op geskikte liggings vir nywerheidsvestiging besluit word. Oor die skoorsteenparameters kan daar wel beheer uitgeoefen word, natuurlik binne die perke wat deur die betrokke proses daarop gelê word. Volledigheidshalwe moet gemeld word dat pluimstyging maar een van die verskynsels is wat die geskiktheid van 'n gebied ten opsigte van lugbesoedelingspotensiaal bepaal, maar die ander faktore is nie binne die raamwerk van hierdie studie ter sake nie.

Die pluimstygingsmodel van Briggs^{1,2} word vry algemeen gebruik, onder andere in die VALLEY-diffusieprogram wat deur die Amerikaanse Environmental Protection Agency aanbeveel word. Venter³ het 'n toetsting van die geldigheid van die Briggs-model onder Hoëveldtoestande gedoen en onder andere gevind dat dit nagenoeg dieselfde pluimstyging as die model van Moore^{4,5} onder sulke toestande gee.

Die benadering wat in hierdie studie gevolg is, is dat die model in sy geheel aanvaar is en dat die fisiese geldigheid van die modelaannames nie bevraagteken word nie. Die resultate wat verkry word, word dan verklaar in terme van die model en nie in terme van die fisiese werklikheid nie.

DIE MODEL

Die Briggs-model gebruik die volgende parameters

$$\rho_g = \frac{\rho_o P T_o}{P_o T_g} \quad (1)$$

$$\dot{V} = \pi R^2 W \quad (2)$$

$$\dot{Q} = c_p \rho_g \dot{V} (T_g - T) \quad (3)$$

$$F = 8,8 \times 10^{-6} \dot{Q} P_o / P \quad (4)$$

$$s = g(\partial \Theta / \partial z) / T \quad (5)$$

Briggs onderskei twee gevalle, te wete

(1) Onstabiele en neutrale atmosfeer

In hierdie geval voldoen die stabiliteitsparameter aan die voorwaarde $s \leq 0$ waar die ongelykheid dui op onstabiele en die gelykheid op neutraliteit. In die gebied $x \geq x_m$ be-

*Aan wie korrespondensie gerig moet word

hou die pluim sy maksimum styging wat gegee word deur

$$H_m = 1,6 F^{1/3} x_m^{2/3} \bar{u}^{-1} \\ = 78 \frac{\dot{V}^{3/5}}{\bar{u}} (1-T/T_g)^{3/5} \quad (6)$$

waar

$$x_m = 120 F^{2/5} = 190 \dot{V}^{2/5} (1-T/T_g)^{2/5} \quad (7)$$

(2) Stabiele atmosfeer

In hierdie geval is $s > 0$. Die maksimumpluimstyging word gegee deur

$$H_m = 2,9 \left[\frac{F}{\bar{u}s} \right]^{1/3} = 2,0 \left[\frac{\dot{V}}{\bar{u} \partial\theta/\partial z} \right]^{1/3} (T-T^2/T_g)^{1/3} \quad (8)$$

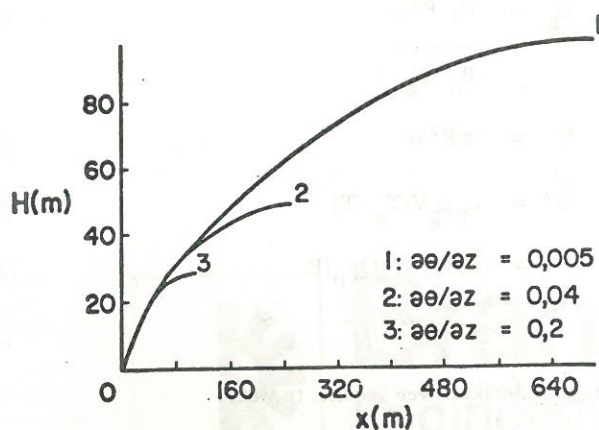
Hierdie styging word bereik by die punt

$$x_m = \pi \bar{u}s^{-1/2} = \bar{u} \left[\frac{T}{\partial\theta/\partial z} \right]^{1/2} \quad (9)$$

DIE ROL VAN $\partial\theta/\partial z$

In die onstabiele/neutrale geval is H_m en x_m onafhanklik van $\partial\theta/\partial z$.

Vir die stabiele geval volg uit vergelykings (8) en (9) dat beide H_m en x_m toeneem soos $\partial\theta/\partial z$ afneem en dat hierdie toename die sterkste is in die omgewing $\partial\theta/\partial z \rightarrow 0$. Eersgenoemde neiging blyk duidelik uit figuur 1 en tabel 1. In figuur 1 word pluimtrajekte vir verskillende $\partial\theta/\partial z$ -waardes geskets en in tabel 1 word die H_m -waardes vir dieselfde reeks $\partial\theta/\partial z$ -waardes gegee asook die persentasietoenames ten opsigte van die styging by $\partial\theta/\partial z = 0,2 \text{ K.m}^{-1}$. Hierdie en die hieropvolgende resultate is verkry vanaf 'n rekenaarprogram wat deur Venter en Fourie⁶ beskryf is.



FIGUUR 1

Pluimtrajekte in die stabiele geval vir drie verskillende waardes van $\partial\theta/\partial z$ (K.m^{-1})

TABEL 1

Verandering in H_m met $\frac{\partial\theta}{\partial z}$ vir die stabiele geval

$\frac{\partial\theta}{\partial z}$ (K.m^{-1})	H_m (m)	%-toename
0,2	28,6	0
0,04	48,8	71
0,005	97,7	242

In die limiet $\partial\theta/\partial z \rightarrow 0$ groei H_m oor alle grense. Dit is egter uit fisiese oorwegings duidelik dat H_m in die stabiele geval nie groter as in die neutrale geval kan wees nie. Deur te eis dat H_m in die neutrale geval altyd groter as of gelyk aan H_m in die stabiele geval moet wees, word verkry dat

$$\frac{\partial\theta}{\partial z} \geq \frac{1,7 \times 10^{-5} \bar{u}^2 T}{\dot{V}^{4/5} (1-T/T_g)^{4/5}}$$

moet wees om die formule vir 'n stabiele atmosfeer te kan gebruik. As dit nie geld nie, moet die atmosfeer as neutraal geneem word.

Gemiddeld is die sterkste inversie in die Hoëveld oor die onderste 150 m ongeveer 18°K , dit wil sê 'n gemiddelde waarde van $0,12^\circ\text{K.m}^{-1}$ vir $\partial\theta/\partial z$, maar oor die onderste 15 tot 20 m kan $\partial\theta/\partial z$ so hoog soos $0,2^\circ\text{K.m}^{-1}$ wees⁷. Omdat 'n inversie by groter hoogtes dus dikwels nie so sterk soos naby die grond is nie, beteken dit dat $\partial\theta/\partial z$ nie so 'n groot dempende invloed op styging sal hê indien pluime by groter hoogtes vrygelaat word nie.

Uit die voorafgaande blyk die wenslikheid ten opsigte van pluimstyging van 'n klein $\partial\theta/\partial z$. Volledigheidshalwe moet daarop gewys word dat onder sterk stabiele toestande die spreiding van die pluim in die vertikale rigting klein is⁸. Onder sekere omstandighede sal die grondvlakkonsentrasies dan laag wees. Volledige beskrywings hiervan word deur Briggs¹ en Pasquill⁹ gegee.

Daar moet ook op gelet word dat 'n hoë gemiddelde windspoed ($\bar{u} \sim 10 \text{ m.s}^{-1}$) die atmosfeer na 'n neutrale toestand laat neig as gevolg van deegliker meganiese menging¹⁰. Vir 'n windspoed van 10 m.s^{-1} sal waardes van $\partial\theta/\partial z$ wat baie van 0 verskil nie voorkom nie. Vir sulke hoë windspoede moet die atmosfeer óf as swak stabiel óf as neutraal beskou word.

DIE ROL VAN \bar{u}

In die onstabiele/neutrale geval is $H_m \propto \bar{u}^{-1}$ terwyl x_m onafhanklik van \bar{u} is. As \bar{u} dus verdubbel sal H_m se waarde gehalveer word. In figuur 2 en tabel 2 word onderskeidelik pluimtrajekte en pluimstygings vir verskillende \bar{u} -waardes gegee.

TABEL 2

Verandering in H_m met windspoed \bar{u} vir die onstabiele/neutrale geval

$\bar{u}(m.s^{-1})$	$H_m(m)$	%-afname
3	80	0
5	48	40
7	34	58
9	27	66

In die stabiele geval is $H_m \propto \bar{u}^{-1/3}$ en $x_m \propto \bar{u}$, dit wil sê soos \bar{u} toeneem, neem H_m af maar x_m neem toe. Hierdie toedrag van sake word in figuur 3 en tabel 3 weergegee. Dit blyk duidelik dat \bar{u} se invloed op H_m afneem soos wat \bar{u} toeneem.

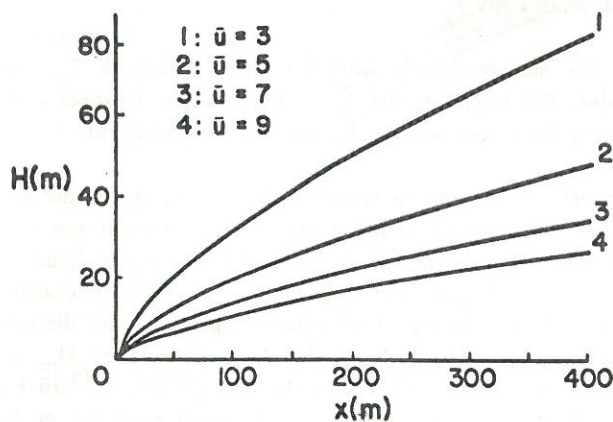
Die rol van \bar{u} in pluimstyging moet egter in samehang met sy rol in advektiewe verdunning gesien word¹. Bostaande is dus nie 'n volledige beeld nie.

DIE ROL VAN T

In die onstabiele/neutrale geval volg vanaf (6)

$$\frac{\partial H_m}{\partial T} = -47 \frac{\bar{u}^{3/5}}{T_g(1-T/T_g)^{2/5}}$$

Daar moet op gelet word dat die temperatuur in al die formules in kelvin is. Die grootte van die afgeleide $\partial H_m/\partial T$ is 'n maat van die invloed van T op H_m . Afgesien daarvan dat H_m afneem met toenemende T, word T se invloed op H_m



FIGUUR 2

Pluimtrajekte in die onstabiele/neutrale geval vir verskillende waardes van windspoed $\bar{u}(m.s^{-1})$

TABEL 3

Verandering in H_m met windspoed \bar{u} vir die stabiele geval

$\bar{u}(m.s^{-1})$	$H_m(m)$	%-afname
3	55,0	0
5	46,4	15,7
7	41,5	24,6
9	38,2	30,7

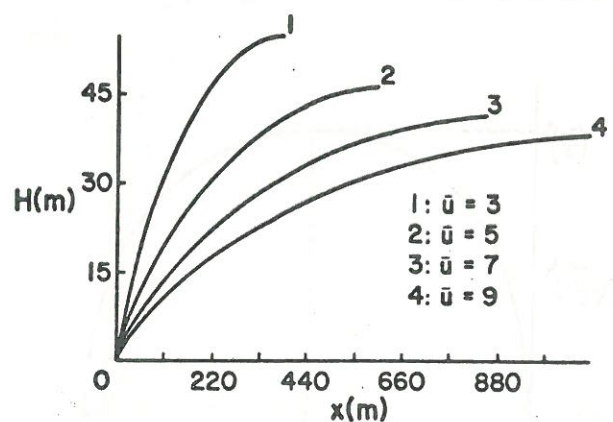
ook groter met toenemende T. Let ook op dat T se rol toeneem met afnemende T_g (kyk na figuur 4). Vanuit vgl (7) volg dat x_m sal afneem soos T toeneem. Met T as parameter kry ons dus 'n reeks pluimtrajekte soos in figuur 5 aangedui. Die gunstige invloed van 'n lae omgewingstemperatuur op pluimstyging blyk ook uit die figuur.

Die persentasieverandering y in H_m oor die interval

$[T_a, T_b]$ in T, word gegee deur

$$y = 100 \left[\frac{T_g - T_a}{T_g - T_b} \right]^{3/5} - 1$$

In tabel 4 word persentasieveranderinge vir 'n aantal losgastemperature gegee soos T afneem van 303°K na 283°K.



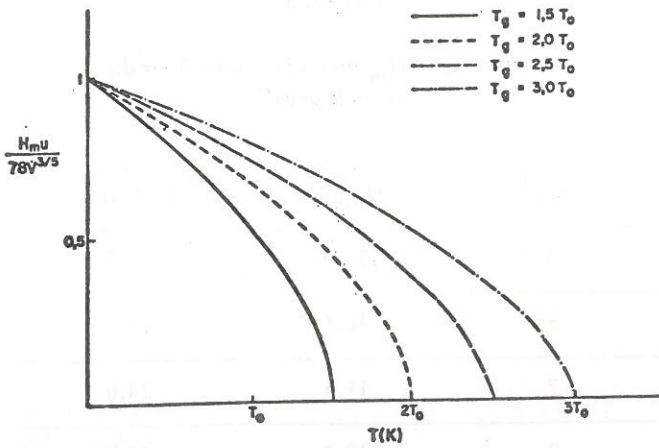
FIGUUR 3

Pluimtrajekte in die stabiele geval vir verskillende waardes van windspoed $\bar{u}(m.s^{-1})$

TABEL 4

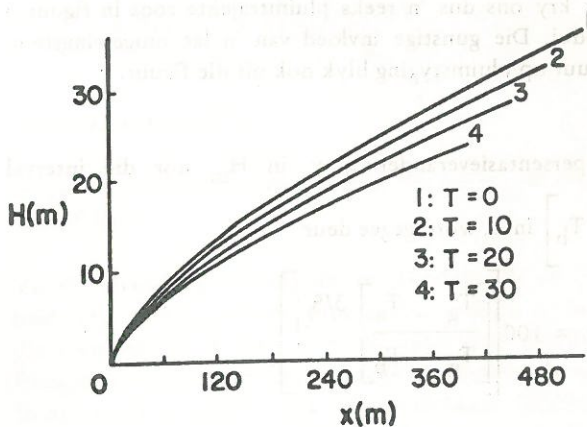
Persentasietoename y in H_m by verskillende T_g -waardes soos T afneem van 303 K na 283 K vir die onstabiele/ neutrale geval

T_g (K)	y (%)
333	35,9
398	12,1
523	5,4
648	3,4
773	2,5



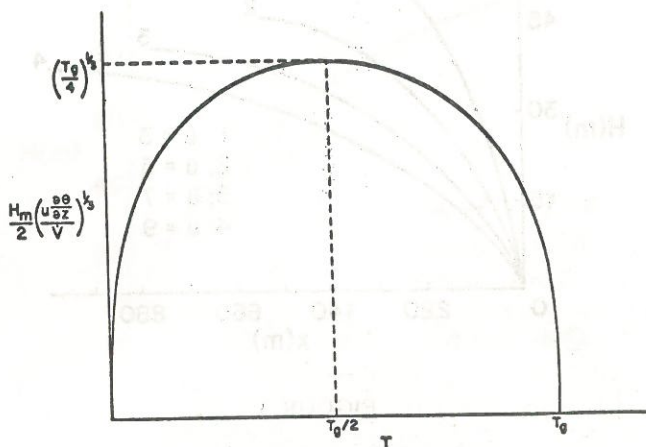
FIGUUR 4

Maksimum pluimstyging as funksie van omgewings-temperatuur in die onstabiele/neutrale geval ($T_0 = 273K$)



FIGUUR 5

Pluimtrajekte in die onstabiele/neutrale geval vir verskillende waardes van omgewingstemperatuur T ($^{\circ}C$)



FIGUUR 6

Maksimum pluimstyging H_m as funksie van omgewings-temperatuur T in die stabiele geval

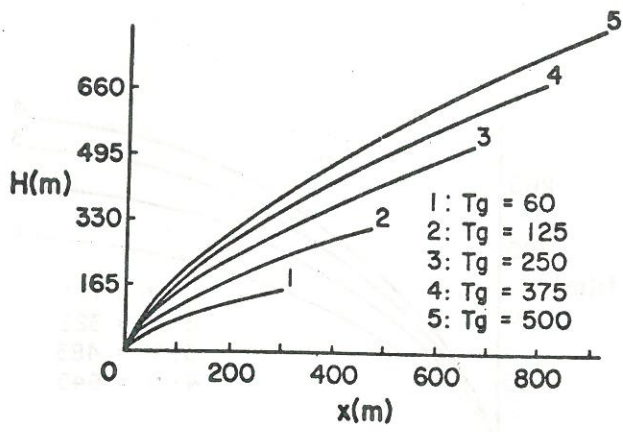
Deur gebruik te maak van vergelyking (8) word gevind, vir die stabiele geval, dat H_m as funksie van T die vorm het soos aangegee in figuur 6. H_m is 'n maksimum by die punt $T = T_g/2$ en simmetries om daardie punt.

Die verklaring vir hierdie verloop is die volgende. Die model aanvaar dat die pluim as gevolg van turbulente afskuiwing met 'n groot volume lug gemeng word. Hoewel stygkragtigheid lineêr toeneem met afnemende T , word die digtheid van die atmosfeer groter soos $1/T$ en die gemengde pluim se styging word hierdeur beperk. Vir T -waardes groter as $T_g/2$ word die afnemende stygkragtigheid dominant en pluimstyging word dus hier kleiner met toenemende T . Die implikasie met betrekking tot pluimstyging vir die geval $T_g > 2T$ is voor die hand liggend.

DIE ROL VAN T_g

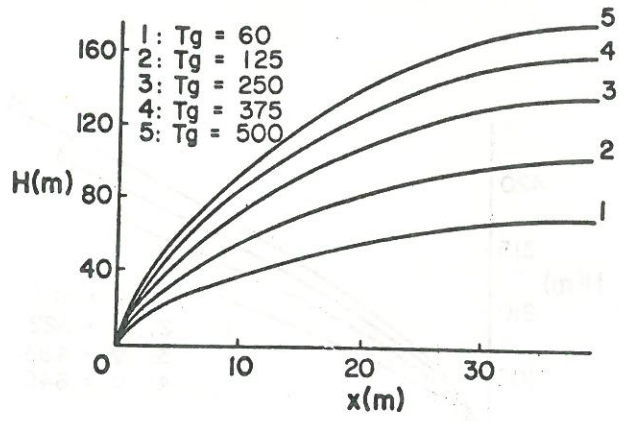
In die hieropvolgende ontleding word alleenlik T_g verander. Dit impliseer dat \dot{V} in die nywerheidsproses konstant gehou moet word sodat die ontleding kan geld.

Uit vergelyking (6) en vergelyking (7) volg dat in die onstabiele/neutrale geval beide H_m en x_m toeneem met toenemende T_g soos in figuur 7 aangetoon word. In figuur 8 word H_m as funksie van T_g geskets vir verskillende waardes van T . Vanaf die figuur of deur 'n ontleding van die uitdrukking vir $\partial H / \partial T_g$ blyk dat T_g se invloed op H_m afneem met toenemend T_g en dat $H_m \rightarrow (78 \sqrt{3/5})/\bar{u}$ by hoë T_g . Sulke hoë waardes van T_g word egter nie in die praktyk bereik nie. Verder volg dat T_g se invloed op H_m toeneem met toenemende T hoewel die absolute styging laer is in 'n warmer atmosfeer. Al die bostaande afleidings word saamgevat in die volgende nuttige uitdrukking vir die persentasietoename in H_m as die losgastemperatuur van T_{ga} na T_{gb} styg



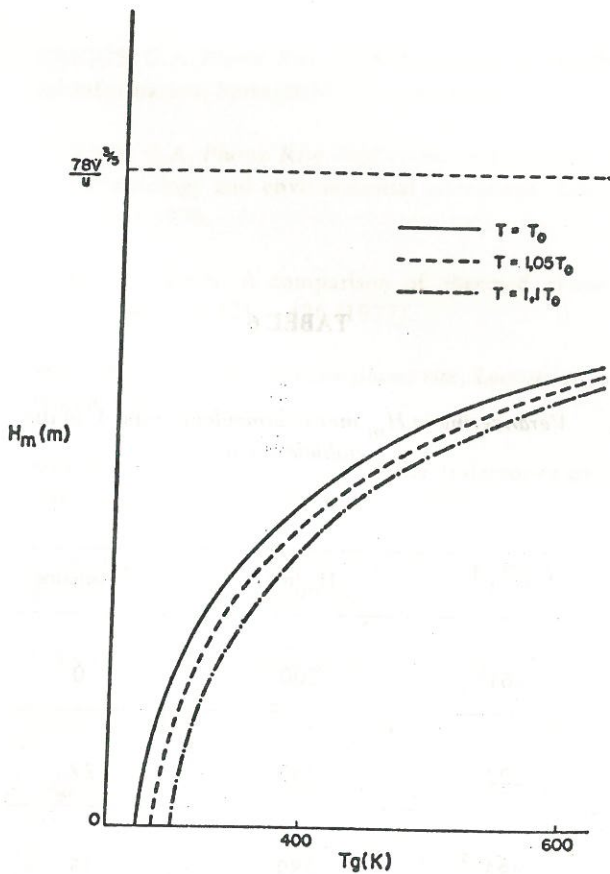
FIGUUR 7

Pluimtrajecte in die onstabiele/neutrale geval vir verskillende lofgastemperature T_g ($^{\circ}\text{C}$)



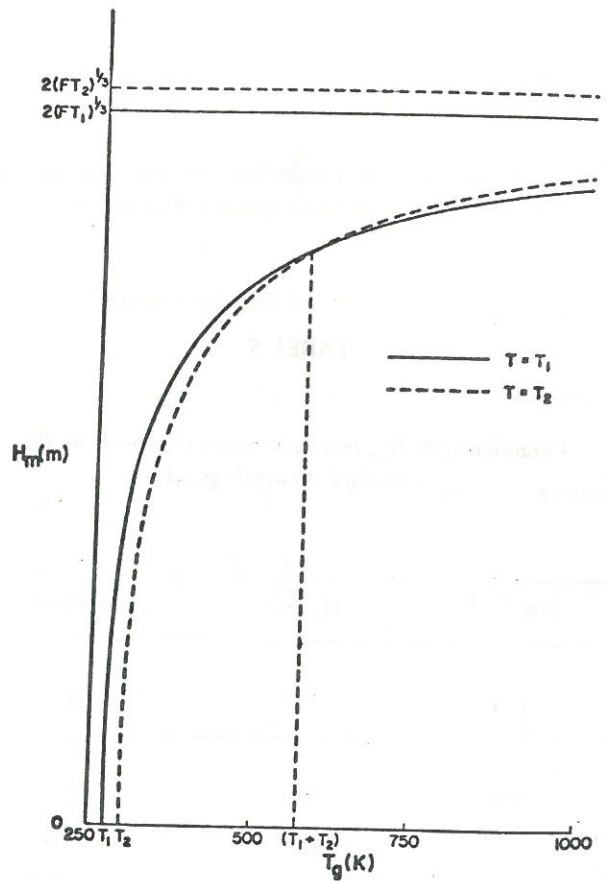
FIGUUR 9

Pluimtrajecte in die stabiele geval vir verskillende lofgastemperature T_g ($^{\circ}\text{C}$)



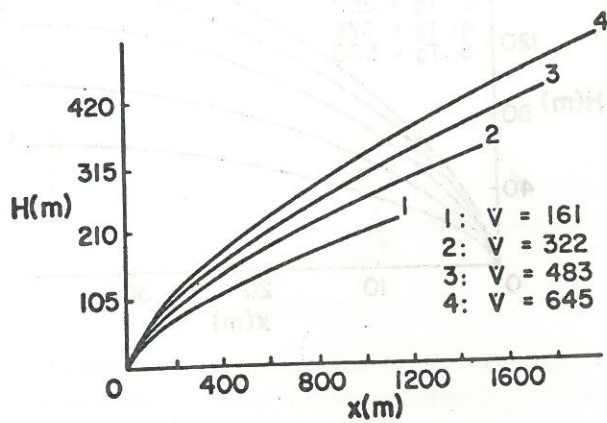
FIGUUR 8

Maksimum pluimstyging as funksie van die lofgastemperatuur in die onstabiele/neutrale geval ($T_o = 273\text{k}$)



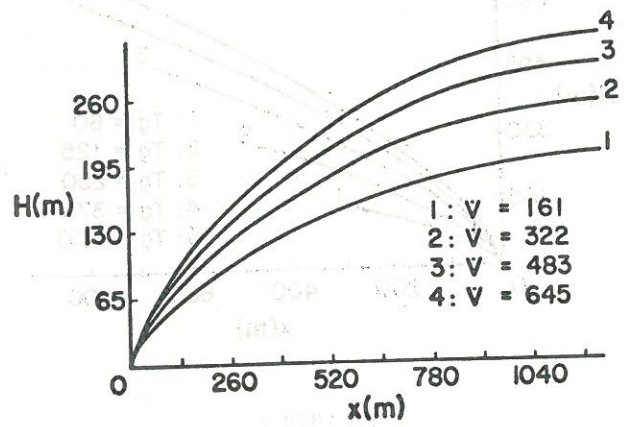
FIGUUR 10

Maksimum pluimstyging H_m as funksie van die lofgastemperatuur T_g in die stabiele geval ($T_1 = 273\text{K}$, $T_2 = 300\text{K}$, $F = \frac{\dot{V}}{u \partial \theta / \partial z}$)



FIGUUR 11

Pluimtrajekte in die onstabiele/neutrale geval vir verskillende volumevloei tempo's $\dot{V}(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$



FIGUUR 12

Pluimtrajekte in die stabiele geval vir verskillende volumevloei tempo's $(\dot{V}(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}))$

TABEL 5

Verandering in H_m met volumevloei tempo \dot{V} in die onstabiele/neutrale geval

$\dot{V}(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$H_m(\text{m})$	%-toename
161	227	0
322	344	52
483	438	93
645	521	130

TABEL 6

Verandering in H_m met volumevloei tempo \dot{V} in die stabiele geval

$\dot{V}(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$H_m(\text{m})$	%-toename
161	200	0
322	253	27
483	289	45
645	318	59

$$y = 100 \left[\left[\frac{1 - T/T_{gb}}{1 - T/T_{ga}} \right]^{3/5} - 1 \right]$$

In die stabiele geval neem H_m toe met toenemende T_g en x_m is onafhanklik van T_g (figuur 9). Die invloed van T_g neem af soos T_g toeneem (figuur 10). Die persentasie-toename in H_m as die losgastemperatuur van T_{ga} na T_{gb} toeneem, is

$$y = 100 \left[\left[\frac{1 - T/T_{gb}}{1 - T/T_{ga}} \right]^{1/3} - 1 \right]$$

Die gedrag van die pluim indien $T_g > 2T$ word ook in figuur 10 getoon. In die gebied $T_g > (T_1 + T_2)$ is H_m groter by die hoër omgewingstemperatuur T_2 as by T_1 .

DIE ROL VAN \dot{V}

In hierdie paragraaf word, analoog aan die vorige paragraaf, implisiet aanvaar dat die nywerheidsproses so gereguleer word dat T_g konstant bly indien \dot{V} verander word.

In die onstabiele/neutrale geval is $H_m \propto \dot{V}^{3/5}$ en $x_m \propto \dot{V}^{2/5}$. 'n Reeks pluimtrajekte vir verskillende \dot{V} -waardes word in figuur 11 gegee en die ooreenkomstige H_m -waardes en persentasietoenames in tabel 5. Die toename in H_m soos \dot{V} toeneem, kan met die formule

$$\frac{H_{1m}}{H_{2m}} = \left[\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} \right]^{3/5}$$

bereken word. Indien, byvoorbeeld, \dot{V} met 25% toeneem dit wil sê $\dot{V}_1/\dot{V}_2 = 1,25$ is $H_{1m}/H_{2m} = 1,14$, dit wil sê slegs 'n 14% toename. Hierteenoor kan byvoorbeeld die feit gestel word dat 'n verdubbeling in windspoed 'n halvering van H_m tot gevolg sal hê.

In die stabiele geval is $H_m \propto \dot{V}^{1/3}$ en x_m is onafhanklik van \dot{V} (kyk na figuur 12 en tabel 6). Indien \dot{V} met 25% vermeerder sal H_m met slegs 8% vermeerder, terwyl 'n 25%-verhoging in die windspoed \bar{u} hierdie vermeerdering geheel en al weer sal uitwis.

VERWYSINGS

1. BRIGGS, G.A. *Plume Rise*, USAEC Critical Review Series, TID-25075, Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, Springfield, Virginia, 1969.
2. BRIGGS, G.A. *Plume Rise Predictions in Lectures on air pollution and environmental impact analysis*, AMS Workshop on meteorology and environmental assessment, Boston, Mass., D A Haugen, Workshop Co-ordinator, 29 September – 3 Oktober 1975.
3. VENTER, G.P.N. A comparison of observed plume trajectories with those predicted by two models, *Atmospheric Environment* 11 421 – 426 (1977).
4. MOORE, D.J. *Some notes on plume rise*, Lecture series 58, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-St-Genèse, België (1973).
5. MOORE, D.J. A comparison of the trajectories of rising buoyant plumes with theoretical/emperical models, *Atmospheric Environment* 8 441 – 457 (1974).
6. VENTER, J.C. en FOURIE, O.L., *Rekenaarstudie van pluimtrajekte volgens die Briggs-model*, WNNR-verslag ATMOS/81/25, Pretoria, November 1981.
7. VAN GOGH, R.G. Persoonlike mededeling (1981).
8. GIFFORD, F.A. Turbulent diffusion-typing schemes: a review, *Nuclear Safety* 17 68 – 86 (1976).
9. PASQUILL, F. *Atmospheric Diffusion*, Ellis Horwood, Chichester (1974).
10. VENTER, G.P.N. en CLOSS, R.L., Vertroulike WNNR-verslag (1978).
11. BRIGGS, G.A. Persoonlike mededeling (1981).

LYS VAN SIMBOLE

Die volgende simbole word in die artikel gebruik

\dot{V}	= volumevloei tempo van die losgas	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
\dot{Q}	= warmtevloei tempo van die losgas	$(\text{J} \cdot \text{s}^{-1})$
F	= stygkragtigheidsvloed	$(\text{m}^4 \cdot \text{s}^{-3})$
s	= stabiliteitsparameter	(S^{-2})
R	= straal van skoorsteen	(m)
w	= (vertikale) losgassnelheid	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
c_p	= soortlike warmte van lug	$= 1\,015 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
g	= gravitasieversnelling	$= 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
$\frac{\partial \theta}{\partial z}$	= potensieletemperatuurgradiënt	$(\text{K} \cdot \text{m}^{-1})$
\bar{u}	= gemiddelde windspoed	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
H_m	= maksimum styging van die middellyn van die pluim relatief tot die bopunt van die skoorsteen	(m)
x_m	= afstand windaf waarby die pluim sy maksimum styging bereik soos gemeet vanaf die as van die skoorsteen	(m)
ρ	= digtheid	$(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
p	= druk	$(\text{Pa of mm Hg of mbar})$
T	= temperatuur	(K)

waar die laaste drie simbole sonder voetskrif dui op omgewingswaardes van die atmosfeer, die voetskrif o dui op NTD-waardes en die voetskrif g dui op waardes van die losgas. Dus is

$$P_o = 100 \text{ kPa} = 760 \text{ mm Hg} = 1\,000 \text{ mbar}$$

$$\rho_o = 1,293 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$T_o = 273 \text{ K}$$