

KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT

De Bilt

WETENSCHAPPELIJK RAPPORT

W.R. 75-9

F.Th.M. Nieuwstadt

Het gebruik van windpersistentiegegevens
voor het berekenen
van concentratiestatistieken

De Bilt, 1975

Publikationsnummer: K.N.M.I. W.R. 75-9 (MO)

U.D.C.: 551.510.42 :
551.551

INHOUD

Inleiding.

I. Berekening van concentratiestatistieken voor
verschillende perioden.

II. Resultaten.

Referenties.

Tabellen.

Figuren.

Appendix : The use of wind-persistence data for the
calculation of concentration statistics.

ABSTRACT

For zoning purposes around nuclear reactors a frequency distribution function of dilution factors for different averaging times (from one hour to several days) must be known.

A method based on the Gaussian plume model and on wind-persistence data has been used for the calculation of these statistics. This method is extensively discussed in a separate paper, which has been added to this report in the form of an appendix.

Several results have been calculated using this method, and these are presented in the form of tables and figures.

-o-o-o-

Inleiding

In verband met de zonering bijvoorbeeld rond kerncentrales moet een statistiek van verdunningsfactoren, gemiddeld over perioden van één uur, één dag en langer, worden bepaald. Met behulp van het Gaussische pluimmodel, voorzien van enige modificaties, kan een dergelijke statistiek worden berekend. Een uitgebreide Engelstalige beschrijving van het model is in de vorm van een appendix in dit rapport opgenomen. De resultaten, die met dit model zijn berekend, zijn in de vorm van tabellen en figuren weergegeven.

-o-o-o-

I Berekening van concentratie statistieken voor verschillende perioden

Beknopt zal hier de theoretische achtergrond van de gebruikte rekenmethode worden toegelicht. Een uitgebreide behandeling van de diverse aspecten van deze methode wordt gegeven in [1].

Bij de berekening van de verspreiding van verontreiniging uit een puntbron wordt gebruik gemaakt van het Gaussische pluimmodel, dat uitvoerig wordt besproken in (2) en (3). Hierin wordt aangetoond, dat mits verschillende veronderstellingen worden gemaakt, de concentratie onder de pluimas op grondniveau kan worden beschreven met de volgende formule

$$\chi = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} e^{-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}} \quad (1)$$

Hierin is

χ	: de concentratie	(g/m ³)
Q	: de bronsterkte	(g/s)
σ_y, σ_z	: de dispersieparamters in resp. laterale en verticale richting	(m)
u	: de windsnelheid	(m/s)
H	: de effectieve bronhoogte	(m)

De dispersiecoëfficiënten, die een maat vormen voor de verspreiding door turbulentie loodrecht op de gemiddelde windrichting, zijn afhankelijk van de toestand van de atmosfeer. In de meeste gevallen worden de dispersiecoëfficiënten onderverdeeld naar een aantal diskrete stabiliteitsklassen [2, 3].

Vergelijking (1) geeft een concentratieverdeling, gemiddeld over korte perioden van de orde van één uur. Een statistiek van deze uurgemiddelde concentraties kan worden berekend m.b.v. een frekwentieverdeling van de meteorologische factoren in vergelijking (1): de windsnelheid en de stabiliteitsklassen. Voor de berekeningen van deze statistiek is hier gebruik gemaakt van de meteorologische waarnemingen van het station Schiphol.

Bij een uitbreiding van vergelijking (1) over lange perioden van de orde van dagen moet in rekening worden gebracht dat de windrichting gedurende de beschouwde periode verandert. M.a.w. de veranderingen van de windrichting dragen bij tot de laterale verspreiding. De over de beschouwde periode, bijvoorbeeld een dag, gemiddelde concentratie onder de gemiddelde pluimas op grondniveau wordt nu, zonder afleiding, gegeven door de volgende vergelijking

$$\chi = \sum_s \sum_n f(s, n) \frac{Q}{\pi \sigma_{zs} \sqrt{\sigma_{ys}^2 + z^2 \sigma_{gs}^2} u_n} e^{-\frac{H^2}{2\sigma_{zs}^2}} \quad (2)$$

Hierin is σ_{φ} in radialen de standaarddeviatie van de normale verdeling, die een benadering vormt van de aktuele windrichtingsverdeling rond de over de periode gemiddelde windrichting; r (m) is de afstand tot de bron. De funktie $f(s, n)$ is de verdelingsfunktie van windsnelheidsklassen (n) en stabiliteitsklassen (s) tijdens de beschouwde periode. Om een statistiek van de gemiddelde konzentratie over de beschouwde periode te kunnen konstrueren wordt de veronderstelling gemaakt dat voor voldoende lange perioden (minstens 24 uur) de konzentratie statistiek volledig wordt bepaald door de windpersistentie statistiek. Het argument, dat hieraan ten grondslag ligt, is: naarmate de windpersistentie groter is, d.w.z. de richtingsverandering van de wind kleiner is, wordt de konzentratie verspreid over een kleiner gebied. Hierdoor is de over de periode gemiddelde konzentratie hoog. Behalve een berekening van de konzentratie gemiddeld over de beschouwde periode kan m.b.v. de windpersistentie gegevens ook een uitspraak gedaan worden over de sektor die wordt beïnvloed door de pluim tijdens de beschouwde periode. In [4] is een windpersistentie statistiek gepubliceerd met behulp waarvan de konzentratie gemiddeld over de beschouwde periode en een statistiek van deze konzentraties is berekend; zie [1].

Een andere toepassing van het Gaussisch pluimmodel is voor zeer lange perioden (in de orde van een seizoen of een jaar) waarvan wordt verondersteld dat alle windrichtingen zijn voorgekomen. Voor deze perioden kan de konzentratie worden bepaald met het zogenaamde lange termijn Gauss model [2, 3].

$$\chi = \sum_s \sum_n f(\varphi, s, n) \frac{Q}{\sqrt{\pi/2} \sigma_{zs} U_n \tau} e^{-H^2/2\sigma_{zs}^2} \quad (3)$$

Hierin is $f(\varphi, s, n)$ de verdelingsfunktie over de windrichtingen (φ) de windsnelheids- (n) en de stabiliteitsklassen (s).

Een aantal resultaten van berekeningen met het hierboven beschreven model wordt gegeven in het volgende hoofdstuk.

Bij dit model, dat dus gebaseerd is op het Gaussische pluimmodel, kunnen een aantal opmerkingen worden gemaakt die hieronder puntsgewijs worden behandeld.

- a) Een belangrijk probleem bij de berekeningen volgens het Gaussische pluimmodel is de keuze van de te gebruiken dispersiekoefficienten, (σ_y en σ_z) omdat uit studies is gebleken dat de resultaten van het model zeer gevoelig zijn voor een verandering van de dispersiekoefficienten. Gekozen is voor de volgende dispersiekoefficienten: voor hoge bronnen ($H = 100$ m) worden de dispersiekoefficienten van Bultynck en Malet gebruikt, omdat deze parameters zijn gebaseerd op experimenten met hoge bronnen en omdat deze parameters het best aansluiten bij de resultaten van [4]. Voor lage bronnen ($H = 0$ m) worden de dispersiekoefficienten van Pasquill gebruikt, omdat deze parameters zijn gebaseerd op experimenten met lage bronnen. De

dispersiecoëfficiënten van Bultynck en Malet zijn over het algemeen groter dan de overeenkomstige dispersiecoëfficiënten van Pasquill, omdat de schaal van de turbulentie op grote hoogte groter is dan op lagere hoogte. Ver van de bron zullen de resultaten volgens het Gaussisch pluimmodel berekend met beide coëfficiënten daarom niet tot elkaar naderen. Dit is te wijten aan het feit dat bij de afleiding van het Gaussische pluimmodel wordt verondersteld dat de turbulentie geen functie van de hoogte tot het aardoppervlak is.

- b) De hierboven summier geschetste beschouwingen kunnen niet worden toegepast in de nabijheid van de bron. De lokale omstandigheden, maar ook de windstille situaties kunnen aanleiding geven tot concentraties die niet met het hier besproken model kunnen worden bepaald. Daarom wordt voorgesteld dit model niet dichterbij de bron toe te passen dan op een afstand in de orde van 1 km.
- c) Bij de afleiding van de vergelijkingen (1) en (2) is uitgegaan van een stationair en homogeen stromingsveld gedurende de te beschouwde periode. Het gevolg hiervan is dat de pluimas gemiddeld over de beschouwde periode recht zal zijn en in de gemiddelde windrichting ligt. In de praktijk zal de veronderstelling van een rechte pluimas alleen gemaakt mogen worden als een statistiek van een groot aantal gevallen beschouwd wordt. Voor de laterale verdelingsfunctie van de concentratie kan in dit geval als eerste benadering een Gaussische verdeling met standaarddeviatie $\sigma_y^* = \sqrt{\sigma_y^2 + z^2 \sigma_\phi^2}$ gekozen worden. Omdat vrij snel als functie van de afstand tot de bron geldt $\sigma_\phi z \gg \sigma_y$ volgt dus als benadering $\sigma_y^* \approx z \sigma_\phi$. Resultaten die op deze manier worden berekend, dienen gecontroleerd te worden met berekeningen waarbij van een ander functioneel verband voor laterale concentratie gebruik gemaakt wordt. Indien blijkt, dat de resultaten gevoelig zijn voor het gekozen functionele verband dient men bijzonder voorzichtig te zijn met de resultaten, wegens het feit dat de laterale verdelingsfunctie slechts als een benadering is ingevoerd. M.a.w. men dient bijzonder voorzichtig te zijn als de conclusies, die uit de berekeningen volgen afhankelijk blijken te zijn van de laterale verdelingsfunctie.
- d) In aktuele gevallen zal de gemiddelde pluim in de beschouwde perioden horizontale slingeringen vertonen (meanderen). M.b.v. de windpersistentie gegevens kan nu voor de beschouwde periode een schatting gemaakt worden voor de sektor waarbinnen de invloed van de pluim waarschijnlijk beperkt blijft. Hiertoe wordt berekend de sektor rond de gemiddelde windrichting, waarbinnen in 80% van de tijd de windrichting en dus ook de pluim zich zal bevinden. De hoek wordt aangeduid als α_{80} .

- e) Een beperking van het hier beschreven model is, dat gedurende de gehele periode de bronsterkte Q konstant is. Voor de berekening van doses is deze beperking echter niet essentieel, omdat de doses worden verkregen uit een integratie van de concentratie over de tijd. M.a.w. het is voldoende bij de berekening van doses een konstante effectieve bronsterkte te gebruiken, die bij integratie over de beschouwde periode dezelfde dosis oplevert als een integratie van de tijdsafhankelijke concentratie.
- f) Bij de berekeningen met behulp van de vergelijkingen (1), (2) en (3) wordt voor U de windsnelheid op bronhoogte genomen. Voor de lage bronnen wordt de wind op 10 m hoogte genomen. Voor de hoge bronnen wordt de windsnelheid gekorrigeerd voor de bronhoogte m.b.v. de volgende vergelijking
- $$U = U_{10}(H/10)^p \quad (4)$$
- Hierin is U_{10} de wind op 10 m hoogte. Voor de exponent p wordt genomen: stabiliteitsklasse A, B $p = 0.1$, C, D $p = 0.16$ en E, F $p = 0.3$.

II. Resultaten

In dit hoofdstuk worden enige resultaten besproken, die zijn berekend met het in het vorige hoofdstuk beschreven model.

In de berekeningen is gebruik gemaakt van de dispersiecoëfficiënten van Pasquill-Gifford voor lage bronnen ($H = 0$) en de dispersiecoëfficiënten van Bultynck-Malet voor hoge bronnen ($H = 100$). De coëfficiënten zijn vermeld in tabel 1. Tussen de stabiliteitsdefinitie volgens Bultynck-Malet en volgens Pasquill is een verband gekozen, dat eveneens in tabel 1 is opgenomen.

In de figuren 1-4 is de frekwentie statistiek op twee afstanden van de bron en voor twee schoorsteenhoogten van uurgemiddelde concentraties gegeven, berekend volgens formule 1. De berekeningen zijn gebaseerd op een frekwentie-verdeling van meteorologische factoren, zoals die zijn bepaald voor het station Schiphol.

Met deze figuren kan een uitspraak worden gedaan over de statistiek van concentraties, die men gedurende één uur meet op de pluimas van een continue pluim, maar ook van de statistiek van concentraties onder de pluimas, die behoort bij een lozing van één uur. Beide gevallen zijn dus wat de concentraties betreft identiek.

De frekwentie statistieken zijn boven de 80% en beneden de 20% gestippeld. De reden hiervoor is, dat aan deze uiteinden van de frekwentie statistiek een geringere nauwkeurigheid wordt toegekend. Het model zal voor extreme situaties namelijk minder nauwkeurig zijn. Ook is de vorm van de frekwentie statistiek v.w.b. de uiteinden sterk afhankelijk van de gebruikte dispersiecoëfficiënten. In tabel 2 is verder opgenomen welke windsnelheden en welke

stabiliteitsklassen bijdragen aan de concentratie in de buurt van diverse percentielen in de figuren 1 t/m 4. Uit deze tabel volgt dat verschillende atmosferische situaties aan een percentiel bijdragen.

In tabel 3 en 4 zijn de mediaan en het ca 95-98 percentiel van de 24 uren en de 96 uren gemiddelde concentratie onder de pluimas gegeven voor twee afstanden tot de bron en twee schoorsteenhoogten. Deze statistiek kan eveneens worden toegepast voor de twee situaties hierboven beschreven i.v.m. de statistiek van uurgemiddelden.

De foutlimiet achter de concentraties is bepaald uit de halve "range" van een serie resultaten, die zijn berekend met verschillende verdelingen van windsnelheid en stabiliteitsklassen. Deze getallen dienen niet worden aangezien voor de totale fout, die met het model gemaakt kan worden en die groter zal zijn. De gegeven concentratie is het gemiddelde van de serie.

De waarden van σ_3 en α_{80} die zijn besproken in het vorige hoofdstuk, zijn eveneens in de tabel opgenomen.

Bij het toepassen van de statistiek wordt er van uitgegaan dat deze in eerste benadering onafhankelijk is van de windrichting.

De fout die hiermee gemaakt wordt, bij toepassing in een specifieke richting, ligt binnen de nauwkeurigheid van het model. In tabel 5 is verder gegeven de gemiddelde jaarlijkse verdeling van de windrichting in sectoren van 30° voor het station Schiphol.

In de figuren 5 en 6 zijn concentraties uitgezet gemiddeld over een jaar berekend met het lange termijn Gauss model, waarbij de concentratie is gemiddeld over alle windrichtingen. Voor de berekening is gebruik gemaakt van de gegevens van het station Schiphol.

Het werkelijk jaargemiddelde concentratiepatroon is echter niet cirkelsymmetrisch. De verschillen tussen het cirkelsymmetrische patroon en het ware patroon zijn afhankelijk van de plaats en liggen vrijwel altijd binnen de faktor twee, die als nauwkeurigheidsgrens voor het model wordt opgegeven. Veel gegevens betreffende verdunningsfactoren zijn slechts voor twee afstanden tot de bron bepaald. De resultaten voor tussenliggende afstanden kunnen in eerste benadering door lineaire interpolatie in een log-log grafiek worden bepaald.

Voor afstanden kleiner dan 2 km gelden de bezwaren zoals deze in het vorige hoofdstuk zijn beschreven. Voor afstanden groter dan 10 km kan als eerste benadering gebruik gemaakt worden van een lineaire extrapolatie in een log-log grafiek. Hierbij moet men zich realiseren, dat de toepassing van het Gauss-model, waarop de gehele methode is gebaseerd, beperkt is tot enkele tientallen kilometers van de bron [2, 3].

Een uitbreiding van de resultaten van de tabellen 3 en 4 naar andere waarden van de percentielen kan v.w.b. de verdunningsfactoren het best geschieden door lineaire interpolatie op logaritmisch waarschijnlijkheidspapier. De resultaten voor σ_p kunnen worden uitgebreid naar verschillende percentielen m.b.v. figuur 7. De waarden van de α_{80} kunnen hierbij gevonden worden m.b.v. figuur 8.

In [1] wordt besproken hoe de mediaan van de concentratie statistiek afhangt van de middelingstijd. Uit de daar besproken resultaten volgt dat deze afhankelijkheid bij benadering beschreven kan worden met de volgende vergelijking

$$\chi_m(t_1)/\chi_m(t_2) = (t_2/t_1)^k \quad (5)$$

Hierin ligt de exponent k tussen 0.4 en 0.5. Voor andere percentielen van de verdelingsfunctie kan een dergelijk eenvoudig verband waarschijnlijk niet gevonden worden.

REFERENTIES

- [1] F.T.M. Nieuwstadt - The use of wind-persistence data for the calculation of concentration statistics. (Opgenomen in de vorm van een appendix).
- [2] F.T.M. Nieuwstadt - Het Gaussische pluimmodel. KNMI Wetenschappelijk Rapport W.R. 74-15 (1974)
- [3] KNMI Luchtverontreiniging en Weer. Staatsuitgeverij, Den Haag (1974).
- [4] L.M. Malet en H. Bultynck - Persistence de la direction horaire du vent dans la couche limite planétaire. KMI, Brussel, Publ. Serie B, no. 76 (1974).

-o-o-o-

TABEL 1

Dispersiekoefficienten volgens Pasquill-Gifford en Bultynck-Malet

$$\sigma_z = a x^b + c, \quad \sigma_y = \alpha x^\beta$$

	Stabiliteitsklasse	a	b	c	α	β
Pasquill-Gifford ≥ 1000 m	A	0.00024	2.094	-9.6	0.5269	0.8649
	B	0.054	1.0997	2.5397	0.3710	0.8664
	C	0.991	0.9255	1.7383	0.2092	0.8971
	D	0.9248	0.5474	-9.0641	0.1277	0.9050
	E	2.3441	0.4026	-16.3186	0.0975	0.9019
	F	6.5286	0.2593	-25.1583	0.0653	0.9023
Bultynck-Malet	E ₆	1.321	0.711	0	0.946	0.796
	E ₅	0.950	0.711	0	0.826	0.796
	E ₄	0.700	0.711	0	0.586	0.796
	E ₃	0.520	0.711	0	0.418	0.796
	E ₂	0.382	0.711	0	0.297	0.796
	E ₁	0.311	0.711	0	0.235	0.796
	E ₇	0.819	0.669	0	1.043	0.698

Korresponderende stabiliteitsklasse definities

Pasquill-Gifford	Bultynck-Malet
A	E ₆
B	E ₅
C	E ₄
D	E ₃
E	E ₂
F	E ₁
D (U > 11 kts)	E ₇

TABEL 2

Windsnelheden, stabiliteitsklassen en verdunningsfactoren voor diverse percentielen

Frekwentie-verdeling	percentiel	verdunningsfaktor s/m ³	stabiliteits- klasse	windsnelheid (m/s)
figuur 1	90	5.4 10 ⁻⁵	E	2
			D	1
figuur 2	50	9.0 10 ⁻⁶	D	5.5
	90		4.0 10 ⁻⁶	E
figuur 3		7.5 10 ⁻⁷	D	1
	50		3.5 10 ⁻⁶	D
figuur 4	90	5.6 10 ⁻⁷	E ₃	2
			E ₂	2
	E ₁		2.5	
	E ₃		5.5	
	E ₆		1.5	
	E ₅		2.5	
	E ₄		3.5	
	E ₃		1.5	
	E ₂		2.5	
	E ₁		3	
50	1.5 10 ⁻⁷	E ₃	6	
		E ₆	1	
		E ₅	2	
		E ₄	3.5	

TABEL 3

Koncentratie onder de pluimas voor een bron met hoogte $H = 0$ m (gebruikt zijn de dispersiecoëfficiënten van Pasquill).

tijdsduur (uur)	afstand (m)	percentage beneden de aangeg.koncentr.	koncentratie	σ_y in rad	$\alpha_{80} (^{\circ})$
24	2000	98-95	$(6.8 \pm 0.8) 10^{-6}$	0.092	13
		50	$(2.0 \pm 0.5) 10^{-6}$	0.428	65
	10000	98-95	$(5.8 \pm 0.7) 10^{-7}$	0.092	13
		50	$(1.8 \pm 0.4) 10^{-7}$	0.428	65
96	2000	98-95	$(2.7 \pm 0.4) 10^{-6}$	0.304	44
		50	$(1.0 \pm 0.2) 10^{-6}$	0.846	132
	10000	98-95	$(2.3 \pm 0.4) 10^{-7}$	0.304	44
		50	$(0.9 \pm 0.2) 10^{-7}$	0.846	132

TABEL 4

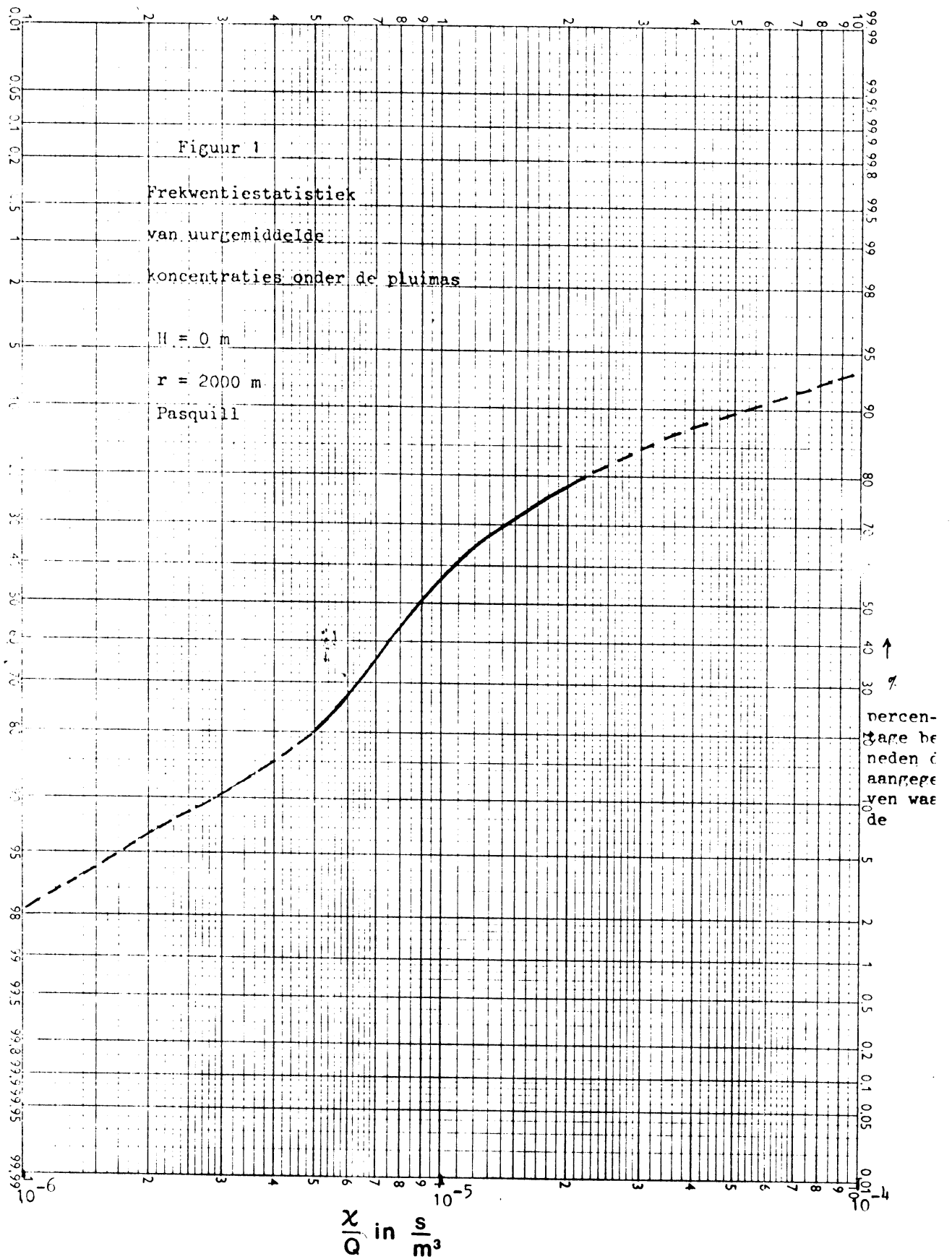
Koncentratie onder de pluimas voor een bron met hoogte $H = 100$ m (gebruikt zijn de dispersiecoëfficiënten van Bultynck en Malet).

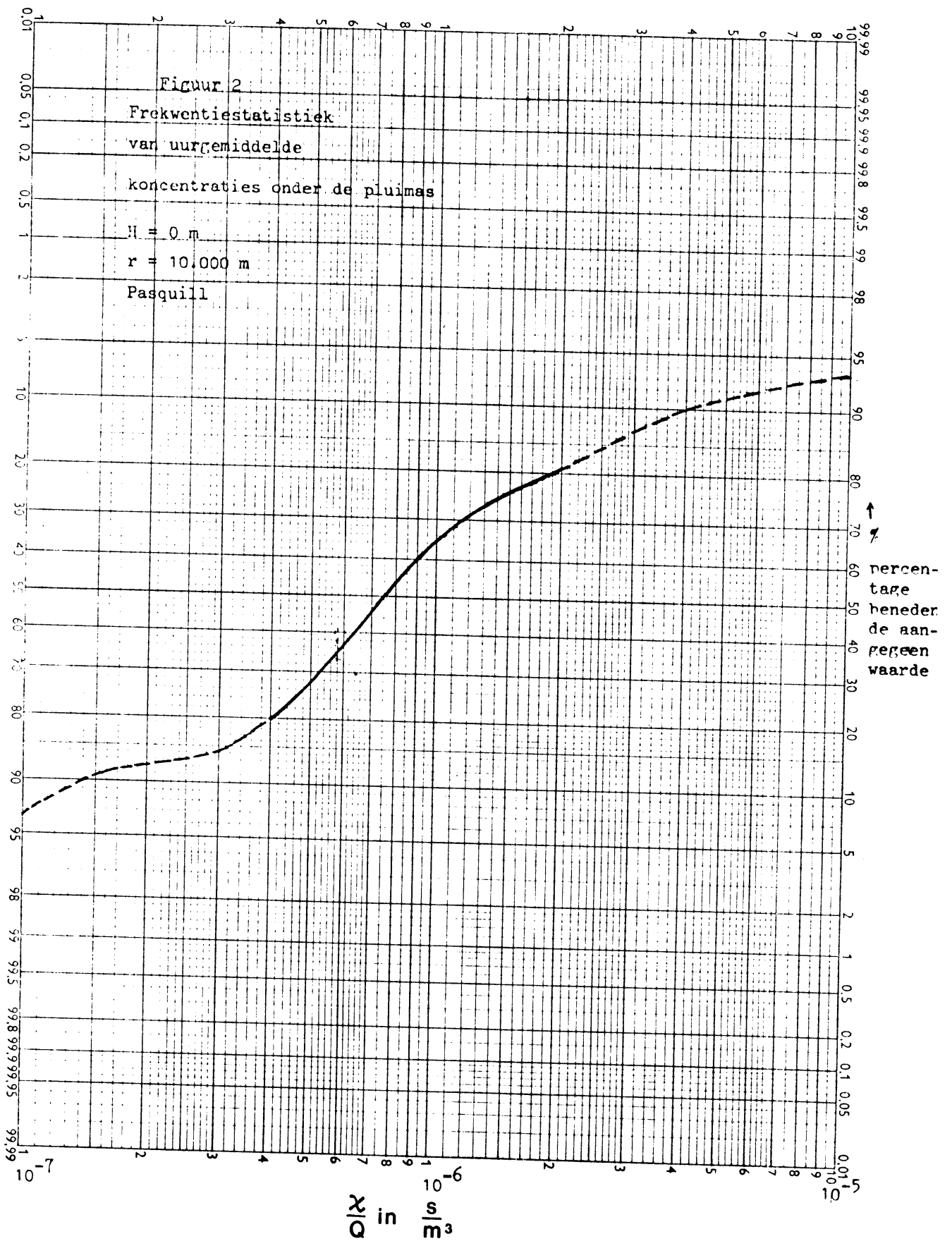
24	2000	98-95	$(9.6 \pm 1.5) 10^{-7}$	0.092	13
		50	$(3.9 \pm 0.3) 10^{-7}$	0.384	58
	10000	98-95	$(1.15 \pm 0.2) 10^{-7}$	0.092	13
		50	$(4.5 \pm 0.7) 10^{-8}$	0.384	58
96	2000	98-95	$(4.0 \pm 0.4) 10^{-7}$	0.304	44
		50	$(1.9 \pm 0.1) 10^{-7}$	0.812	124
	10000	98-95	$(4.6 \pm 0.6) 10^{-8}$	0.304	44
		50	$(2.1 \pm 0.3) 10^{-8}$	0.812	124

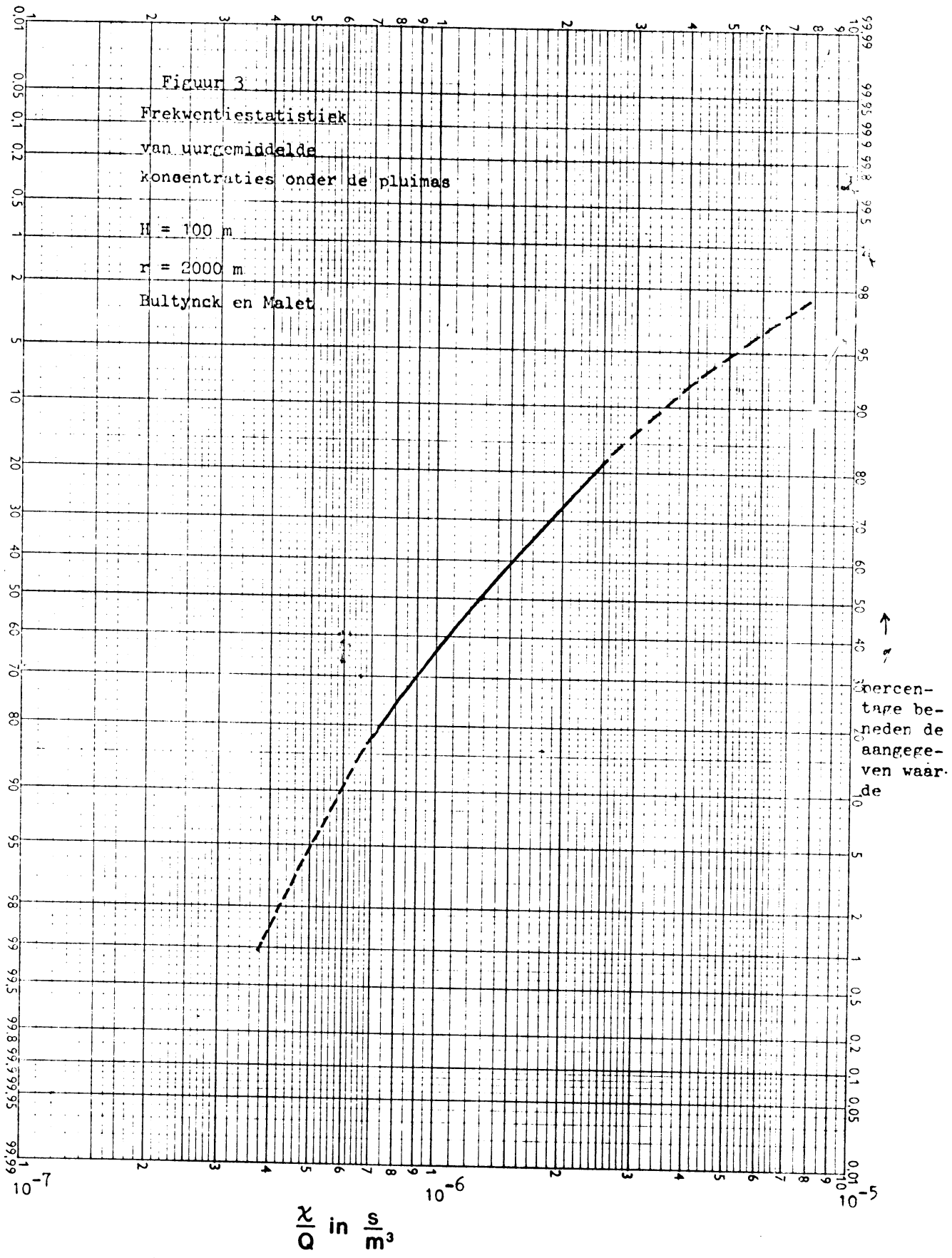
TABEL 5

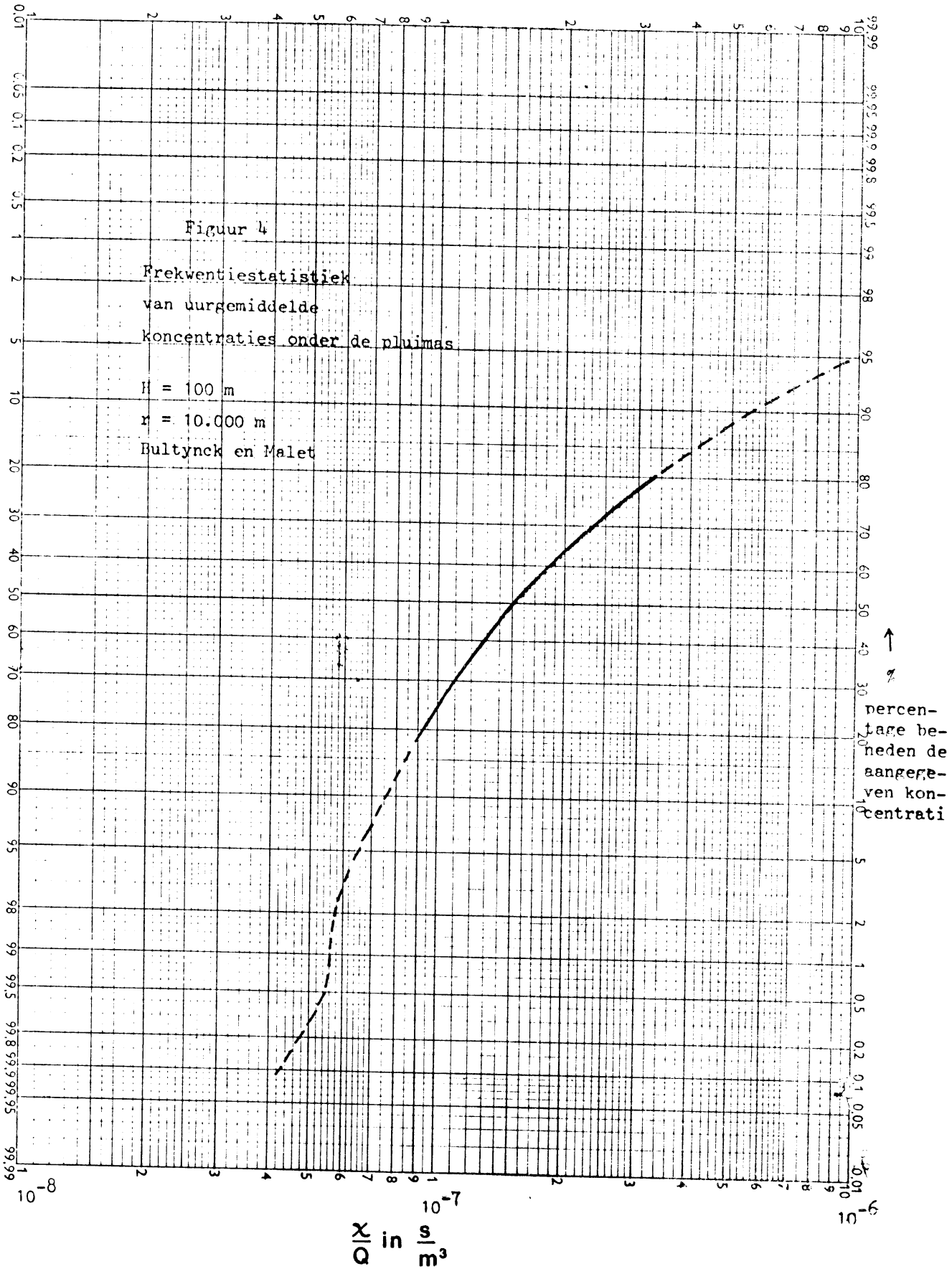
Gemiddelde jaarlijkse verdeling over de windrichtingen

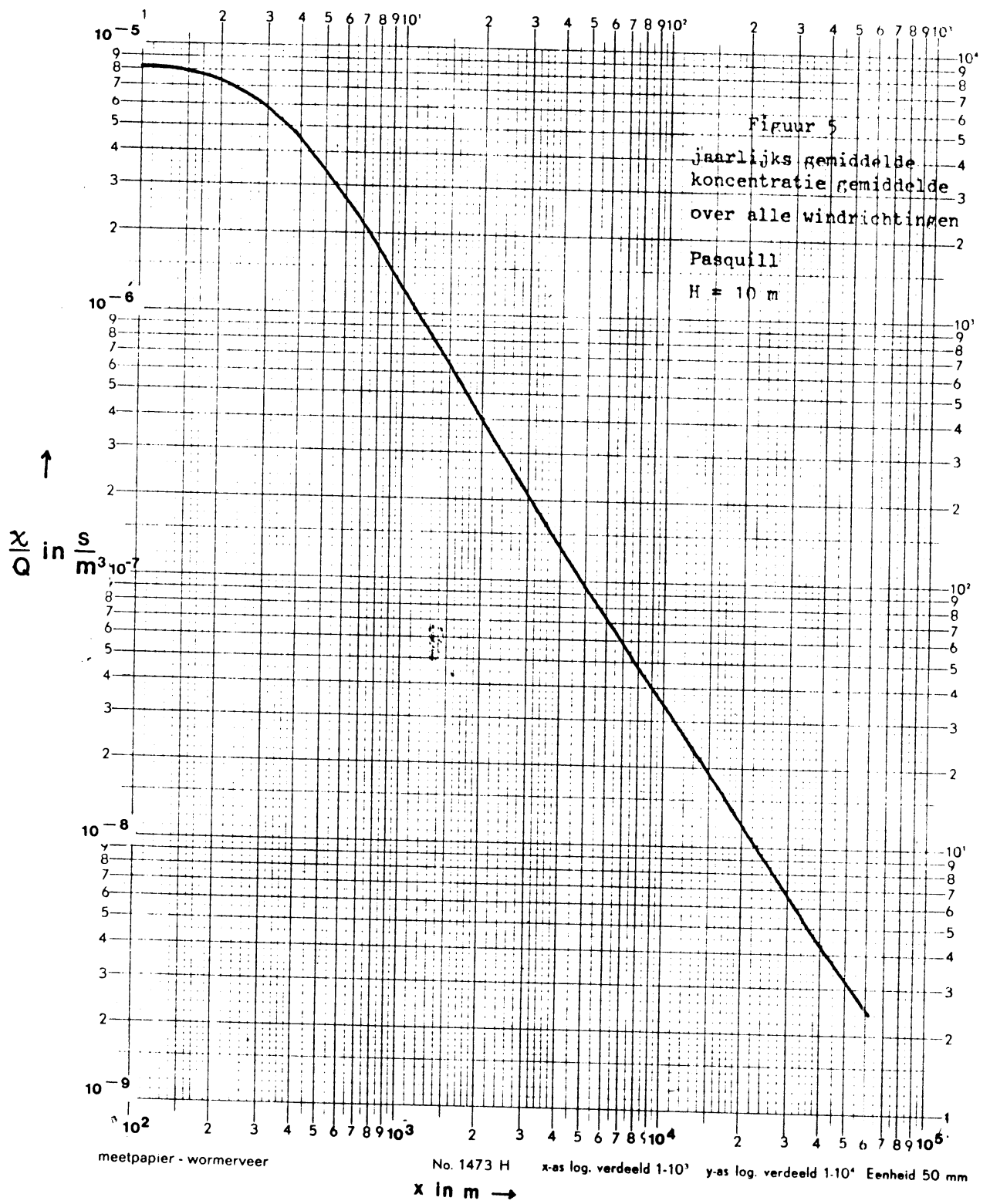
sektor	frekwentie in %
345 - 360 - 015	6.1
015 - 030 - 045	5.2
045 - 060 - 075	8.9
075 - 090 - 105	7.6
105 - 120 - 135	4.6
135 - 150 - 165	7.0
165 - 180 - 195	9.8
195 - 210 - 225	13.1
225 - 240 - 255	13.2
255 - 270 - 285	10.6
285 - 300 - 315	7.1
315 - 330 - 345	6.8

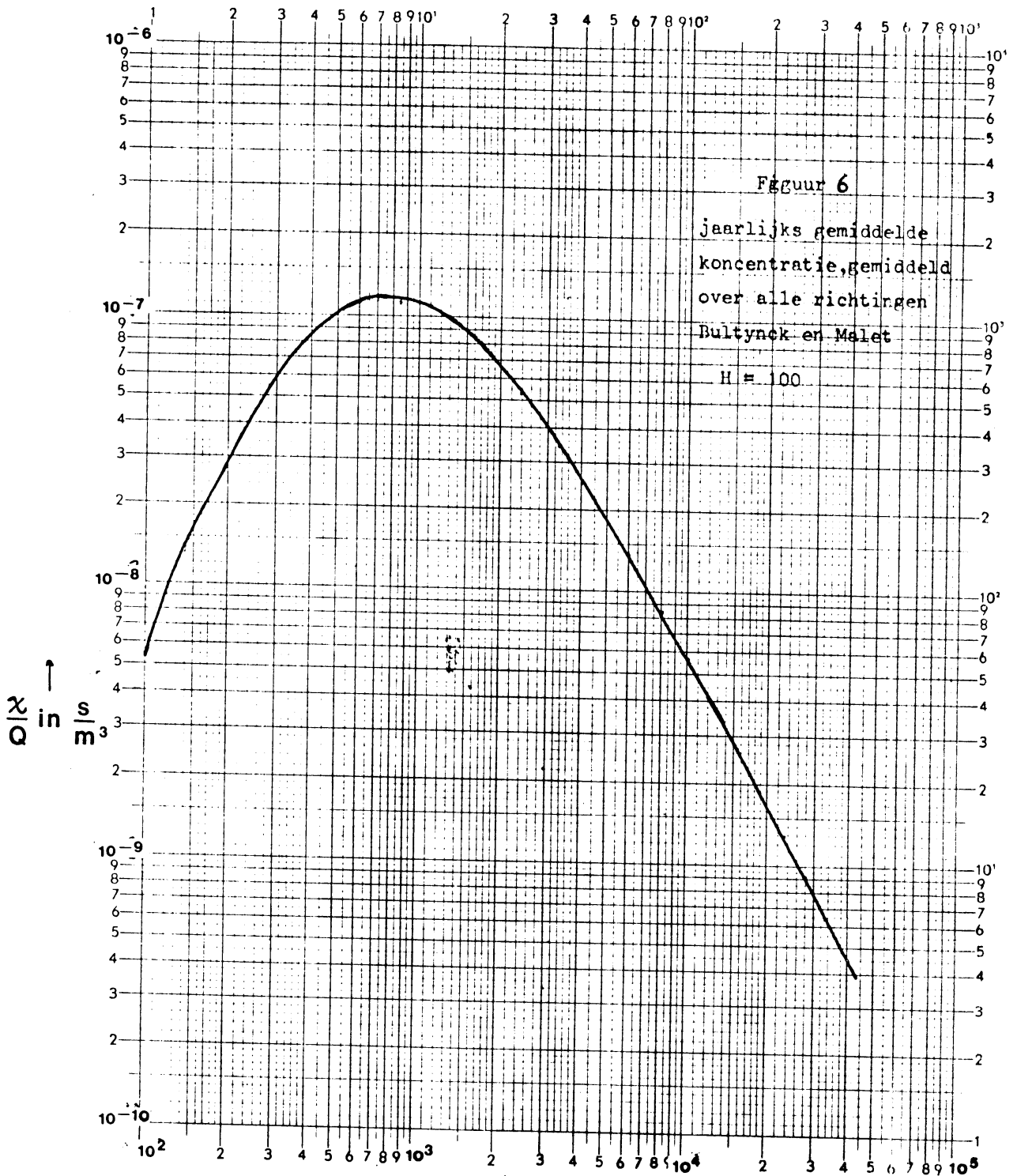








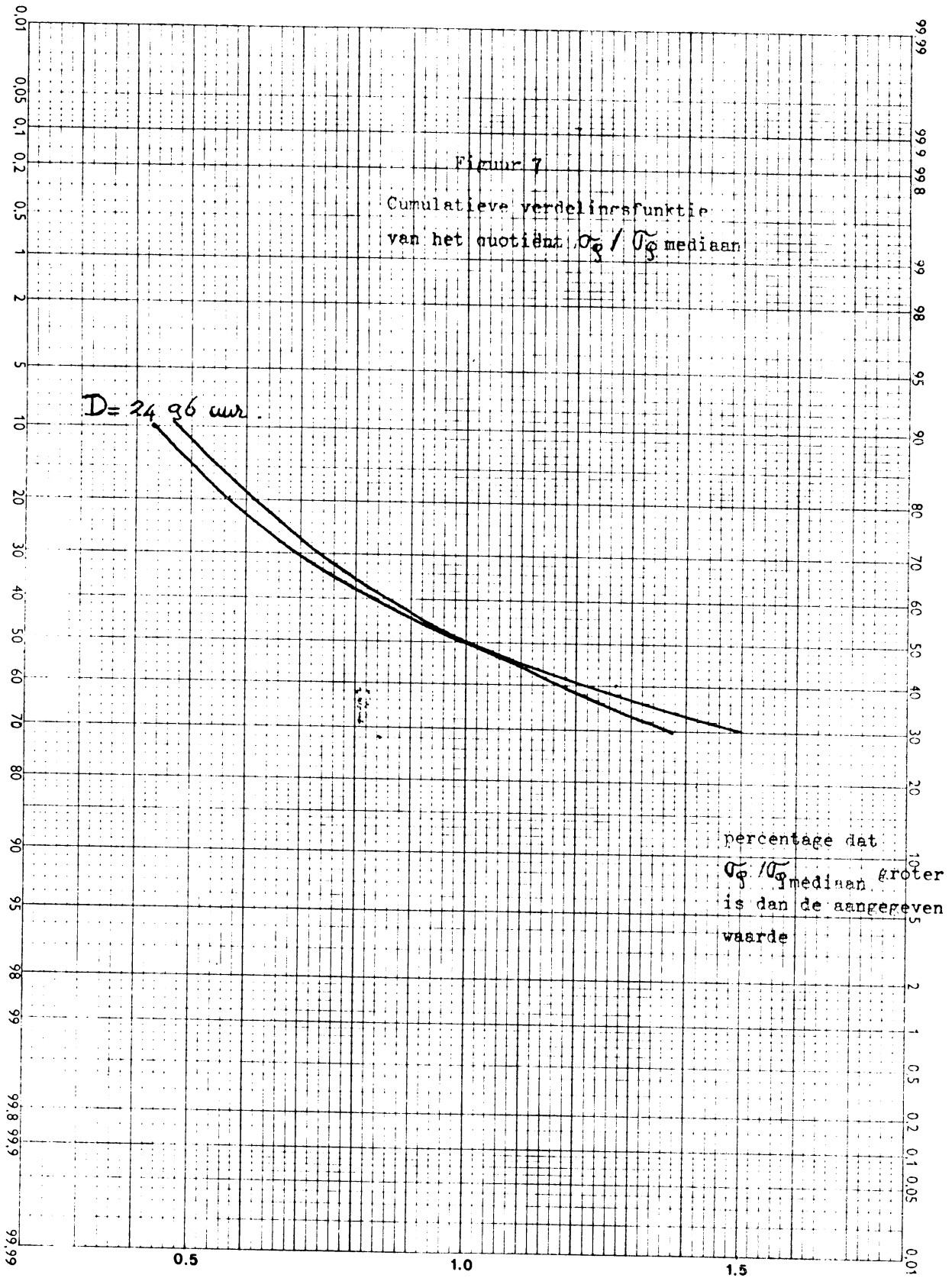




Figuur 6
 jaarlijks gemiddelde
 concentratie, gemiddeld
 over alle richtingen
 Bultynck en Malet
 H = 100

meetpapier - wormerveer

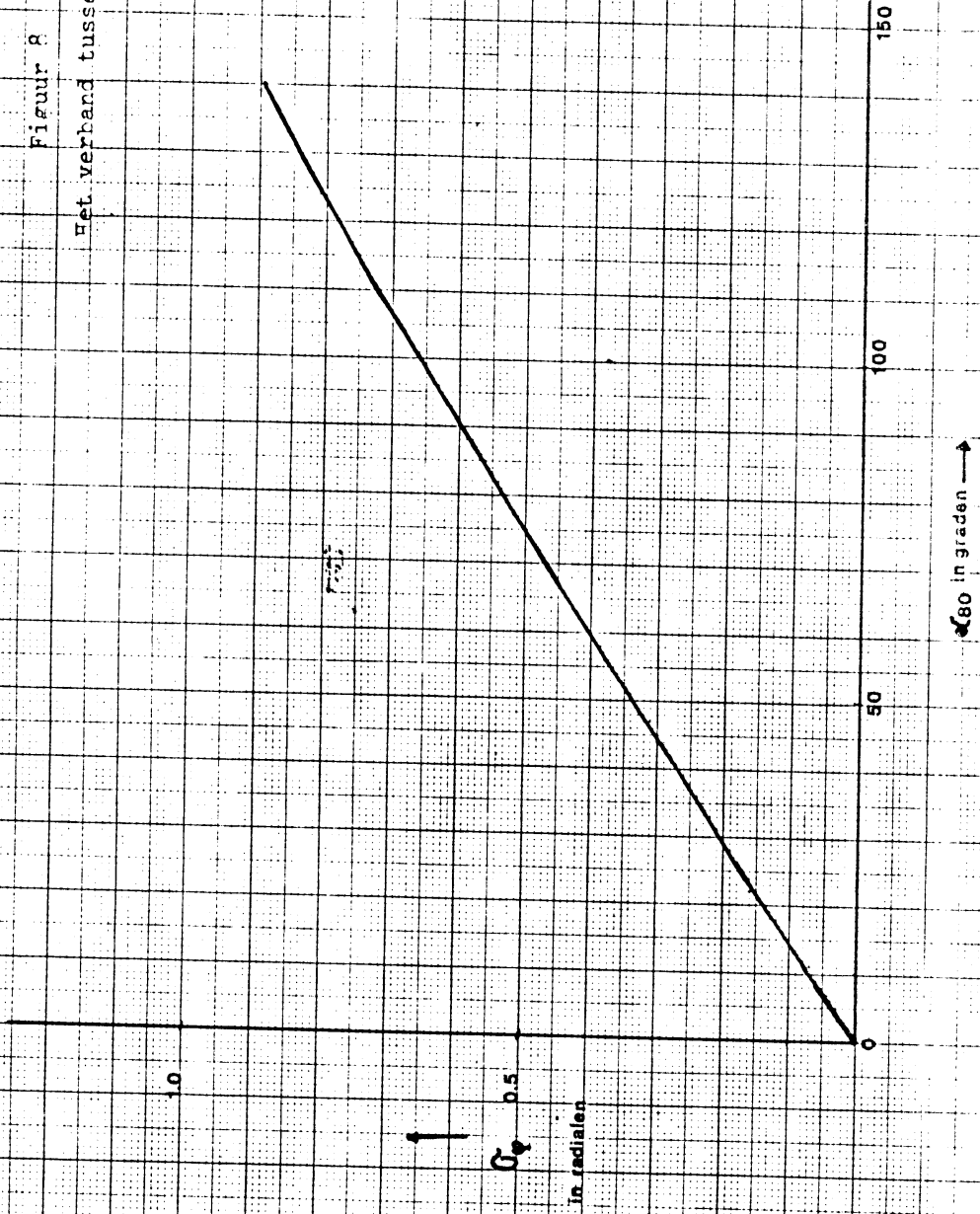
No. 1473 H x-as log. verdeeld $1 \cdot 10^2$ y-as log. verdeeld $1 \cdot 10^4$ Eenheid 50 mm
 → x in m



σ_g / σ_g mediaan

Figuur 8

Het verband tussen G_5 en α_{80}



APPENDIX

THE USE OF WIND PERSISTENCE DATA FOR THE CALCULATION
OF CONCENTRATION STATISTICS.

by F.Th.M. Nieuwstadt.

Royal Netherlands Meteorological Institute
De Bilt.

Abstract.

From the well-known Gaussian plume model may be obtained a frequency distribution of concentrations averaged over a period of time in the order of one hour, if the frequency distribution of the meteorological parameters in the model is known.

For longer averaging times the influence of wind direction fluctuations must be taken into account. One obtains a frequency distribution of concentrations for these averaging times, if it is assumed that the wind persistence is the main factor upon which the concentration averaged over a sufficiently long period depends.

Using the wind persistence data given by Malet en Bultynck (1974), the median and the 98-95 percentile of the frequency distribution of concentrations under the plume axis are calculated for averaging times of 24 and 96 hours. The quotients of these 98-95 percentiles and the medians appear to agree with the results of concentration measurements in complex source areas. It also follows that the dependence of the median upon the averaging time appears to be reasonably well described by a simple power law with an exponent of between 0.4 and 0.5. It is shown that the model, which takes the wind direction fluctuations into account, approaches the results of the so called long term averaged Gaussian plume model for reasonably long periods of time (in the order of one to three months).

I. Introduction.

For zoning regulations around point sources (for instance nuclear reactors) it is necessary to know a frequency distribution of dilution factors for gaseous emittents for various averaging times.

From these results and the knowledge of the emissions and the effects of the dispersed pollutants, the risk in the area around the point source may be evaluated. This article deals only with the determining of the frequency distribution of dilution factors.

The dispersion from a continuous point source in the atmosphere may be estimated with the Gaussian plume model.

With this model one may calculate the concentration averaged over a period of time in the order of one hour (depending on the averaging time of the parameters used).

It is also possible to calculate a frequency distribution of these concentrations, if a frequency distribution of the input parameters in the model is known.

In order to calculate concentrations averaged over periods longer than about one hour, account must be taken of the contribution to the lateral dispersion by mesoscale wind direction fluctuations. One method to include this effect is to consider the power spectrum of wind direction fluctuations for time scales larger than one hour, Naden and Leeds (1972).

Since data on the frequency distribution of these spectra are not available, a simpler method is used here to take the effect of these wind direction fluctuations into account. The method is based on an assumption, which can be used only as a first approximation, that the distribution function of the wind vectors following from the difference between D hourly averaged wind vectors and the wind vector averaged over D hours can be approximated by a circular Gaussian distribution function.

The dependence of the concentration on averaging time is usually described by a simple power law (Larsen, 1969)

$$\chi_1 / \chi_2 = (t_2 / t_1)^P \quad (1)$$

The results described here seem to suggest that this relation may be reasonably well fulfilled for the median of the frequency distribution of the

concentrations under the plume axis, averaged over periods from one hour to several days. The exponent p in the power law (1) appears to lie between 0.4 and 0.5. For other percentiles in the frequency distribution this power law can probably not describe sufficiently the dependence on averaging time. Larsen (1969) also uses the power law only to describe the dependence of the median on averaging time.

It is difficult to compare the results, here presented, with measured data, because to the author's knowledge no measurements exist of plume axis concentrations from a single, isolated continuous point source for some reasonable period of time. However, the quotients of the 98-95 percentile and the median value of the frequency distributions appear to be in accordance with the results found from concentration measurements in a complex source area. For a period of 24 hours this quotient has been calculated to be in the neighbourhood of 3 and for a period of 96 hours in the neighbourhood of 2.5.

II. Wind persistence.

Consider the distribution of hourly averaged wind vectors during some period of D hours.

High wind persistence then means small variability of the hourly averaged wind direction during D .

Wind persistence is dependent upon many parameters, in the first place windspeed and stability of the atmosphere but also on wind direction and topography. These latter conditions however are neglected here.

In order to describe the problem of wind persistence some simplifying assumptions are made after Brooks and Carruthers (1953) and Malet and Bultynck (1974).

The wind vector averaged over a period of D hours is defined as \underline{V}_r .

The difference between \underline{V}_r and an hourly averaged wind vector \underline{V} is given by $\Delta \underline{V}$ (figure 1). The assumption is made that the distribution function of $\Delta \underline{V}$ is circular normal with a standard deviation σ . This leads to the following distribution of \underline{V} around \underline{V}_r .

$$F(|\underline{V}|, \vartheta) |\underline{V}| d|\underline{V}| d\vartheta = \frac{1}{\pi \sigma^2} e^{-\frac{1}{\sigma^2} (|\underline{V}|^2 - 2|\underline{V}||\underline{V}_r| \cos \vartheta + |\underline{V}_r|^2)} |\underline{V}| d|\underline{V}| d\vartheta \quad (2)$$

The assumption of a circular normal distribution function: seems doubtful, if we are considering a definite period D. However, if we consider the statistics obtained from a large number of periods D with the same value of the quotient $\sigma/|\underline{v}_r|$, as we will do here, this assumption seems to be justified.

The main advantage of this assumption is, that the distribution function (2) can be described as a function of only one parameter: $\sigma/|\underline{v}_r|$. Hereafter another parameter: S will be used which has a one to one correspondence with $\sigma/|\underline{v}_r|$ and is given by:

$$S = 2/\pi \arcsin K$$

$$1/K = \frac{1}{|\underline{v}_r|} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} |\underline{v}| F(|\underline{v}|, \varphi) |\underline{v}| d|\underline{v}| d\varphi \quad (3)$$

The parameter S can be used as a measure of wind persistence.

The larger the value of S the larger is the wind persistence (it must be noted that the range of S is confined between 0 and 1).

In Malet and Bultynck (1974) an extensive study is made of wind persistence, using an approach as indicated above. A large amount of data has been measured on for instance frequency distributions of the parameter S for different periods D. These measurement have been carried out in Mol in the Northern part of Belgium.

In the following section the wind direction distribution is needed for small values of φ . This wind direction distribution can be approximated by a Gaussian distribution.

$$f(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\varphi}} e^{-\varphi^2/2\sigma_{\varphi}^2} \quad (4)$$

It can be shown from (2) that for sufficiently small $\sigma/|\underline{v}_r|$, the following relation is valid, $\sigma_{\varphi} = 1/\sqrt{2} \sigma/|\underline{v}_r|$. It is not difficult to find a relation between the σ_{φ} and the parameter S for all values of S. Therefore for each value of S found from the measurements of Malet and Bultynck (1974) a Gaussian distribution (4) can be found.

III. The statistics of concentrations under the plume axis.

For the calculation of the dispersion from a point source the Gaussian plume formula is widely used. For a detailed description of this model one is referred to the literature, for instance Slade (1968). With this model the concentration distribution due to the emission from a continuous point source can be calculated averaged over a period in the order of one hour. During this period one assumes a stationary and homogeneous wind field. The dispersion is caused by atmospheric turbulence, which in the model is classified by means of so called stability classes. The stability classes are determined by readily available meteorological parameters, such as windspeed, cloud cover etc. Pasquill (1961).

The concentration averaged over a short period (one hour) under the plume axis is given by the following equation.

$$\chi = \frac{Q}{\pi \sigma_y(r) \sigma_z(r) U} e^{-H^2/2\sigma_z^2} \quad (5)$$

Where Q [g/s] is the source strength, H [m] the effective height, σ_y and σ_z [m] respectively the lateral and vertical dispersion parameters averaged over this period, which are determined by the stability classes and which are a function of distance r to the source, U [m/s] the representative plume transport velocity.

A frequency distribution of concentrations following from (5) can be found if a frequency distribution of the meteorological parameters is known. In other words, the frequency distribution of windspeeds and stability classes completely determines the frequency distribution of concentrations averaged over a short period of time.

If the concentration is to be calculated averaged over a longer period D (in the order of 24 hours) equation (5) must be modified. One can then distinguish between the dispersion caused by atmospheric turbulence and the dispersion caused by wind direction fluctuations. In fact this implies that the existence of a gap in the atmospheric energy spectrum is assumed. The contribution of the wind direction fluctuations to the lateral dispersion may then be calculated in the following way.

For each wind direction the concentration distribution averaged over a period of one hour, which follows from the Gaussian plume model, must be multiplied by the frequency of that wind direction. Integration over all wind directions

then gives the concentration distribution averaged over the period D. (Naden and Leeds, 1972).

In order to calculate the concentration under the averaged plume axis, which will lie in the direction of the averaged wind vector \underline{V}_r , equation (4) for the wind direction distribution can be used. Only small values of ϕ will contribute to the concentration under the axis, which is known as the slender plume approximation (Calder, 1971). The concentration under this averaged plume axis then becomes:

$$\chi = \sum_s \sum_n f_D(s, n) \frac{Q}{\pi \sigma_{z_s} \sqrt{\sigma_{y_s}^2 + z^2 \sigma_{\phi}^2} U_m} e^{-H^2/2\sigma_{z_s}^2} \quad (6)$$

Where $f_D(s, n)$ is the distribution function of stability classes (s) and windspeed classes (n) during the period D.

A frequency distribution of the concentration given by (6) can be made if a joint frequency distribution of σ_{ϕ} and $f_D(s, n)$ is known. To avoid the large amount of work involved in the calculation of this joint frequency distribution the following assumption is made.

Whenever wind persistence during the period D is high the concentration averaged over D under the plume axis will be high if the other meteorological parameters remain the same. A high wind persistence is given by a high value of the factor S. Since σ_{ϕ} is a unique function of S this will give a small value of σ_{ϕ} . It is now assumed that the wind persistence is the main factor upon which the frequency distribution of the concentration depends. In other words, the frequency distribution of S for a certain period D determines the frequency distribution of the concentration. It is therefore also implicitly assumed that the distribution function $f_D(s, n)$ is completely determined by the factor S.

For long periods (in the order of at least a few months), in which it can be assumed that all wind directions have occurred, the Gaussian plume model can be derived in the following form (Calder, 1971):

$$\chi = \sum_s \sum_n f(\phi, s, n) \frac{Q}{\sqrt{\pi/2} \sigma_{z_s} U_m} e^{-H^2/2\sigma_{z_s}^2} \quad (7)$$

Where χ is the concentration in the direction given by ϕ , and $f(\phi, s, n)$ is the

joint distribution function of wind direction φ , windspeed class (n) and stability class (s) during the period D. Equation (7) is used to calculate the so called long term averaged concentration distribution.

The concentration given by (7) must form a lower bound for the concentration given by (6) as the period D increases. If one assumes that the wind direction distribution in (7) is uniform for all directions and if one neglects the contribution of σ_y in (6) for σ_φ the following upper bound is found:

$$\sigma_\varphi \leq \sqrt{2\pi}, \text{ for a given windspeed and stability class.}$$

The form given by (6) is therefore an intermediate form between (5) and (7).

IV. Results and discussion.

At a distance of $r = 2000\text{m}$ from a source with an effective height of $H = 100\text{m}$ the cumulative frequency distribution of hourly averaged concentrations has been calculated with equation (5) (figure 2). For this calculation use was made of the climatology of windspeed and stability classes of the airport of Schiphol over the period from 1949 to 1970. For the dispersion parameters in equation (3) the parameters of Bultynck-Malet (Bultynck and Malet, 1972) were used. It must be noted that this frequency distribution is very sensitive for the choice of dispersion parameters.

In order to obtain the frequency distribution of concentrations under the plume axis averaged over a period D, one must know the frequency distribution of S during D and for each value of S the distribution function $f_D(s, n)$.

In Malet and Bultynck (1974) the 95-98¹⁾ percentile of S together with $f_D(s, n)$ for D = 24 and 96 hours has been given. For the median of S, given by the same authors for D = 24 and 96 hours, the distribution function $f_D(s, n)$ is chosen to be equal to the average yearly climatology $f(s, n)$ at the airport of Schiphol based on the same data as mentioned above.

With these data and equation (6) the concentration under the plume axis averaged over 24 and 96 hours can be calculated for the same source configuration as described above. The results are given in table 1. The error bounds given in this table are calculated by using different distribution functions $f_D(s, n)$ in (6), which follow from the different synoptic situations¹⁾.

By using the data of Malet and Bultynck (1974) one assumes that the wind persistence data measured in Mol are valid in a much larger area including

1) Results of S and $f_D(s, n)$ have been given for different synoptic situations. The values of S for these cases correspond to the 95-98 percentile in the cumulative frequency distribution.

the airport of Schiphol (at a distance of ~ 150 km of Mol). If one considers periods of at least 24 hours the main factors contributing to wind persistence have a length scale of at least a hundred kilometers, so that this assumption seems to be justified.

In the equations (5) and (6) it is assumed that the plume axis is straight and lies in the direction of the wind averaged over this period, which is probably only true statistically speaking. In one particular case the plume behaviour will not be so predictable; for instance wind direction fluctuations with a time scale comparable to or greater than the period D will cause a meandering of the plume.

It is assumed that the concentration under the average plume axis is still reasonably approximated by the equations (5) and (6). An estimate of the region which in a particular case might be influenced by the plume may be found as follows.

From the wind direction distribution (3), one can find the sector around the wind direction averaged over the period in which sector will lie some chosen percentage, for instance 80%, of the hourly averaged wind directions during the period concerned. This sector is defined as α_{80} .

From table 1 and some other calculations using this method it is found that for the period D = 24 hours the ratio of the 95-98 percentile and median ranges from 2.5 to 3.4. For D = 96 hours this ratio ranges from 2.1 to 2.7. These ranges are comparable to the results found from the statistics of air-pollution data measured at one point in a complex source area as given by Larsen's model (Larsen, 1969). The Rijnmond area near Rotterdam may be considered as a complex source area, so that one may assume that a fixed measuring point in this area will be situated under the axis of a plume for each wind direction. It is found from measurements in this area that the ratio between the 98 percentile and the median is 2.4-2.7 for D = 24 h and 2.1-2.4 for D = 96 h (Zwerver, 1975).

It is well known that the Gaussian plume model cannot be applied under low windspeed circumstances. The concentrations occurring during these conditions are therefore not included in the calculated frequency distributions. It is felt, that the concentrations under these circumstances may be high in the neighbourhood of the source and will there significantly contribute to the statistics of the high concentrations. Therefore the results given here cannot be applied near the source (for distances smaller than in the order of 1 km). Another reason for not applying these results in the neighbourhood of

the source is, that local conditions, for instance buildings, may influence the dispersion, so that the Gaussian point source formula is no longer valid there.

For the several calculations done with this method one may consider the ratio of the median of the frequency distribution of concentrations averaged over a period D and the median of the hourly averaged concentration frequency distribution (figure 3). In many cases a simple power law (1) is assumed for the dependence of the concentration upon averaging time (Larsen, 1969). The results seem to suggest an exponent p of around 0.4-0.5. The power law does not seem suited to describe the dependence of other percentiles upon the averaging time.

In the preceding section it has been discussed, that the long term averaged concentration will be a lower bound for concentrations averaged over a period D , as D increases. The results of concentrations calculated with equation (7), are given in figure 3.

For these results the concentration distribution has been averaged over all wind directions. The calculations have been performed with a distribution function $f(\phi, s, n)$ based on 21 years of meteorological data of the airport of Schiphol. The results are therefore assumed to be representative of the median of the long term averaged concentration. An extrapolation of the results for $D = 24$ and 96 hours seems to indicate, that the long term averaged concentration will be reached after $\sim 10^3$ hours (1-2 months), which seems a very reasonable period of time.

V. Conclusions.

If one assumes that the concentration distribution under the axis of a plume from a continuous point source can be described by the Gaussian plume model, a frequency distribution of concentrations for various averaging times can be constructed. For periods in the order of one hour this frequency distribution is completely determined by the frequency distribution of meteorological parameters used in the model.

For longer periods the wind direction fluctuations on a mesoscale greatly influence the lateral dispersion. It is assumed, that the wind persistence is the most important meteorological factor determining the dispersion of a plume averaged over a sufficiently long period (at least one day).

A frequency distribution of the concentration averaged over this period can then be found from a frequency distribution of a parameter that determines the wind persistence during the period.

-O-O-O-O-O-

Acknowledgements.

Discussions on the subject matter of this article with W.N. Lablans, P.J. Rijkoort and J.A. Wisse are gratefully acknowledged. The calculations underlying the results presented have been performed by B. Oemraw. The author is indebted to the director of the Royal Netherlands Meteorological Institute, dr. M.W.F. Schregardus, for his permission to undertake this study.

-O-O-O-O-O-

References.

1. Brooks, C.E.P. and Carruthers, N. Handbook of statistical methods in meteorology. London: H.M. Stationary Office, 1953.
2. Bultynck, H. and Malet, L.M. Evaluation of atmospheric dilution factors for effluents diffused from an elevated continuous point source. Tellus (1972), Vol. 24, No. 5, p. 455-472.
3. Calder, K.L. A climatological model for multiple source urban air pollution. NATO CCMS, Proceedings of the second meeting of the expert panel on air pollution modeling (1971), No. 5.
4. Larsen, R.I. A new mathematical model of air pollution concentration averaging time and frequency. J.A.P.C.A. (1969), Vol. 19, No. 1, p. 24-30.
5. Malet, L.M. and Bultynck, H. Persistence de la direction moyenne horaire du vent dans la couche limite planétaire. Institut Royal Météorologique de Belgique, Publication Series B, No. 76 (1974).
6. Pasquill, F. The estimation of the dispersion of windborne material. The Met. Mag. (1961), Vol. 90, No. 1,063, p. 33-51.
7. Naden, R.A. and Leeds, J.V. The modification of plume models to account for long averaging times. Atm. Env. (1972), Vol. 6, p. 829-845.
8. Slade, D.W. (ed.) Meteorology and Atomic energy. U.S.A.E.C. (1968).
9. Zwerver, S. Private communication (1975).

period (hours)	distance (m)	percentage in the cumulative frequency distribution	dilution factor (s/m ³)	σ_g (rad)	α_{80} (degrees)
24	2000	98-95	$(9.6 \pm 1.5)10^{-7}$	0.092	13
		50	$(3.9 \pm 0.3)10^{-7}$	0.384	58
	10000	98-95	$(1.2 \pm 0.2)10^{-7}$	0.092	13
		50	$(4.5 \pm 0.7)10^{-8}$	0.384	58
96	2000	98-95	$(4.0 \pm 0.4)10^{-7}$	0.304	44
		50	$(1.9 \pm 0.1)10^{-7}$	0.812	124
	10000	98-95	$(4.6 \pm 0.6)10^{-8}$	0.304	44
		50	$(2.1 \pm 0.3)10^{-8}$	0.812	124

Table 1: Concentration under the plume axis for D = 24 and 96 hours.

Effective height H = 100m. Dispersion coefficients: Bultynck-Malet.

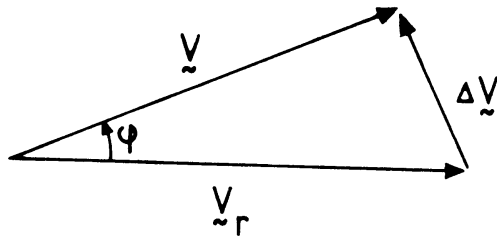


Figure 1: Definition of the distribution of the hourly averaged wind \tilde{V} around \tilde{V}_r .

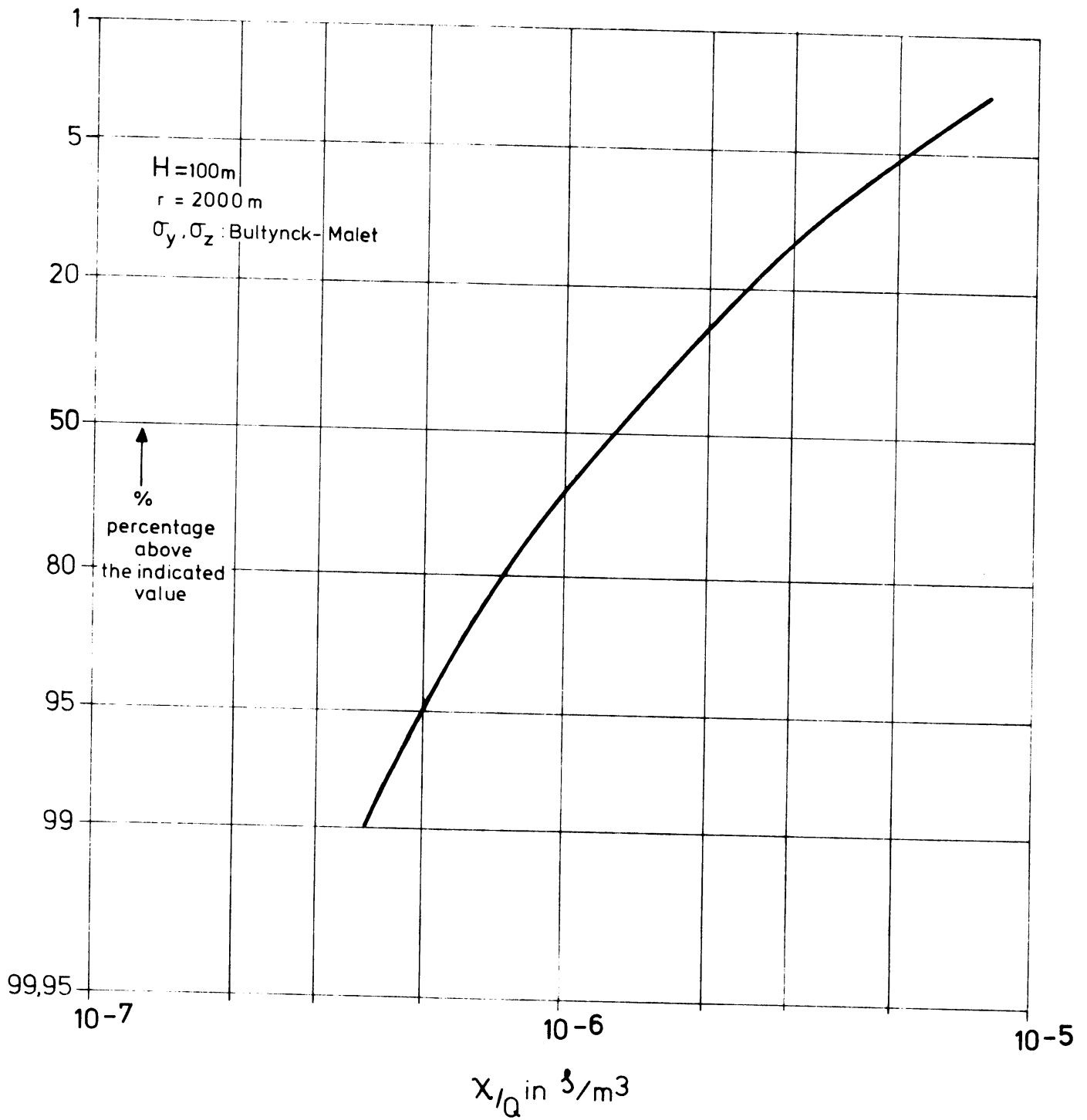


Figure 2: Frequency distribution of the hourly averaged concentration under the plume axis.

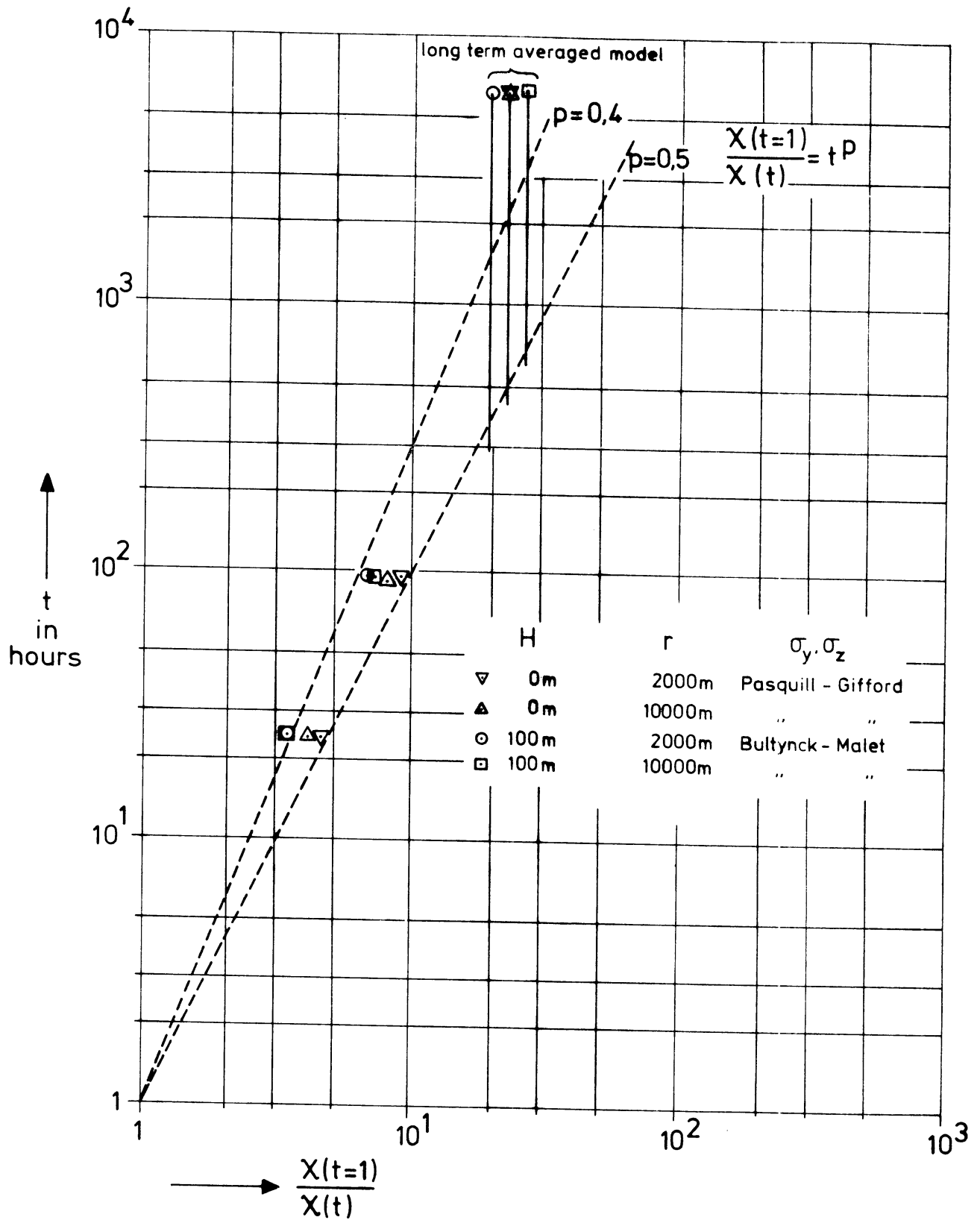


Figure 3: The dependence of the median of the concentration frequency distribution on averaging time.