

KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT

D e B i l t

WETENSCHAPPELIJK RAPPORT

W.R. 70-5

H.R.A. Wessels en J.A. Wisse

De pluim van een grote koeltoren.

De Bilt, 1970

Publikationsnummer: K.N.M.I. W.R. 70-5 (II)

U.D.C. 551.551

Summary.

In connection with a survey possible cooling facilities for large power plants in the Netherlands, the Royal Netherlands Meteorological Institute has been requested to evaluate the meteorological consequences of the employment of large cooling towers.

This report deals with a theoretical study on the dispersion of the emission of a single natural draft cooling tower. Since the emission consists of saturated, heated air, the dispersion is described in terms of the increase of the enthalpy of the air flowing through the tower.

The well-known dispersion formula, based on the work of Pasquill and Gifford is used in this study. A method is developed to derive the limits of the visible plume as a function of the appropriate stability class, wind speed, temperature and relative humidity. The plume rise is not evaluated in this report. All calculations have been carried out for various assumed effective heights.

The following circumstances make a careful application of the method necessary:

- The stability classes and the diffusion model used are only a coarse approximation of the natural dispersion process.
- The large width of the cooling tower will delay the mixing of the interior parts of the plume.
- In situations with low wind speed the method indicates generally large plumes. However, due to variations in wind direction, the plumes will be more or less folded and their length in the average wind direction is overestimated by the method.
- Radiation processes, which might be capable of maintaining the plume during the night as a persistent cloud or fog, are neglected.
- The stability class is estimated from synoptic observations. The process of dispersion, condensation and evaporation takes place at heights ranging from ground level to the effective height. Thus, although windspeed, temperature and humidity are estimated from radiosoundings at a height of 125 meters, the following results should be considered with reservation.

Application of the method developed to the meteorological conditions at de Bilt in winter 1969-1970 indicates that in these winter months during the night plume lengths of 10 km might be possible. 10 per cent of time plumes could be longer than 3 to 4 km, 50 per cent longer than 200 m.

In daytime during the winter months plume lengths up to 2 km might be possible. 10 per cent of time plumes could be longer than 700 m; 50 per cent longer than 100 m.

In winter during the night, plumes longer than 3 km could reach the ground if the effective height is 50 meters. However, if the effective height is 100 meters the plume will reach the ground only very incidentally.

A cooling tower might cause precipitation within a distance of a few hundred meters. In this area, and in the region where the plume reaches the ground, icing may cause an additional nuisance when ground temperatures are below zero.

De pluim van een grote koeltoren.

I. Inleiding.

I.1 In verband met de verwachte toename van het elektriciteitsverbruik in Nederland is de koelwatervoorziening onderwerp van studie. Hierbij is de vraag gerezen of zogenaamde natte koeltorens kunnen worden toegepast. Het koelwater van een centrale wordt in een natte koeltoren gekoeld en kan opnieuw gebruikt worden. De voordelen van een gesloten koelcircuit t.o.v. het lozen van grote hoeveelheden warm water op het openbare water lijken duidelijk. Tegen het gebruik van natte koeltorens worden echter vaak bezwaren ingebracht in verband met mist- en ijsvorming. In overleg met de KEMA heeft het KNMI de vraag in studie genomen hoe groot de pluim van een grote natte koeltoren kan worden. Dit rapport vermeldt de resultaten van die studie.

De schrijvers van dit rapport zijn erkentelijk voor de medewerking van Drs. W.P.A.G. Ottevanger en Drs. A.H.C. Stalenhoef.

I.2 Eerder onderzoek.

In de oudste van de gevonden literatuurverwijzingen (Blum 1948) wordt een goede beschrijving gegeven van het ontstaan van een koeltorenpluim. Deze auteur past een sterke benadering toe, als hij de verspreiding in de atmosfeer uniform denkt binnen een kegel met een halve tophoek van 10 graden. Interessant is dat hij aannemelijk maakt dat motregen nabij de toren in het algemeen door meegevoerde druppels veroorzaakt wordt en niet door neerslagvorming in de pluim.

Baker (1967) toetst de gegevens van Blum aan waarnemingen bij vrij kleine koeltorens.

In een rapport van de Travelers Research Corp. (1969) wordt weliswaar een moderner verspreidingsmechanisme gebruikt, maar wordt geen rekening gehouden met de omstandigheid dat de uit de koeltoren komende lucht meestal warmer is dan de omringende lucht. De pluimlengte wordt dan overschat. In ref 4, 5 en 6 worden bepaalde aspecten kwalitatief behandeld.

Vooraf Lowry (1970) geeft aan hoe weinig eigenlijk nog bekend is.

I.3 Gebruikte eenheden en symbolen.

$u(z)$ gemiddelde windsnelheid in m/s op hoogte z

x, y, z coördinaten, x -as langs de windrichting, z -as vertikaal

h hoogte koeltoren

h' effectieve hoogte koeltoren

f relatieve vochtigheid

m mengverhouding waterdamp-lucht (kg/kg)

m_s verzadigingsmengverhouding waterdamp-lucht (kg/kg)

w mengverhouding vloeibaar water-lucht (kg/kg)

ρ dichtheid (vochtige) lucht bij 0°C en 100%

c soortelijke warmte water; 4187 J/kg °C.

c' soortelijke warmte waterdamp; 1852 J/kg °C.

c^p soortelijke warmte droge lucht; 1005 J/kg °C.

L^p verdampingswarmte van water bij 0°C.; 2.500.000 J/kg

H^o enthalpie van (vochtige) lucht, berekend t.o.v. de enthalpie van droge lucht van 0°C (J/kg).

T luchttemperatuur in °C.

Q bronsterkte koeltoren ten aanzien van enthalpietoename, dit is gelijk aan het door het koelwater aan de lucht afgestane vermogen (J/s)

ϕ per tijdseenheid door de koeltoren stromende lucht (kg/s)

$\sigma_y \sigma_z$ standaarddeviaties van de horizontale en verticale concentratieverdelingen in de pluim

X concentratie in de pluim.

II. De uitworp van een natte koeltoren.

II.1 In een natte koeltoren wordt afkoeling bewerkstelligd van koelwater dat neerwaarts stroomt of valt. De lucht, die nabij de grond de toren door openingen instroomt, verlaat de toren aan de bovenzijde met een hogere temperatuur en met een grotere vochtigheid.

Wat betreft de bouw zijn twee mogelijkheden te onderscheiden als het gaat om het afvoeren van grote warmtestromen ($>100\text{MW}$).

a. Om de koelelementen (10 à 20 meter hoog) wordt een-hyperbolische-schoorsteen gebouwd van circa 100 m. hoogte; de doorstroming van de lucht wordt door de trek van deze schoorsteen bepaald.

b. Boven de koelelementen bevinden zich grote ventilatoren, die voor de luchtverplaatsing zorgen. Om konstruktieve redenen is de grootte van een cel beperkt, zodat voor het afvoeren van grote vermogens vele cellen naast elkaar geplaatst moeten worden. In dit geval zullen de uitstroomopeningen zich 20 à 30 meter boven de grond bevinden.

II.2 Het warmteuitwisselingsproces in een koeltoren is vrijwel isobarisch. Het door het koelwater afgestane vermogen is dan gelijk aan de enthalpie toename van de per tijdseenheid doorgevoerde lucht.

$$Q = \phi \cdot \Delta H$$

De enthalpie H, de som van de voelbare en latente warmte, is hier

$$H = c_p T + (m+w)cT + mL_T$$

Bij atmosferische omstandigheden is dit bij goede benadering gelijk aan:

$$H = c_p T + mL_o + c_p' mT + wcT$$

Zo is b.v. voor lucht van 30°C en 100% relatieve vochtigheid die 1 g/kg. vloeibaar water bevat de enthalpie t.o.v. 0°C

$$H = 3 \cdot 10^4 + 7 \cdot 10^4 + 1,5 \cdot 10^2 + 1,3 \cdot 10^2 \text{ J/kg.}$$

De warmte van het koelwater wordt dan ook voornamelijk gebruikt voor verwarming van de lucht (voelbare warmte) en verdamping van het water (latente warmte). De enthalpie van het vloeibare water vormt slechts een gering deel van de totale enthalpie van verzadigde lucht en waterdruppeltjes.

In Fig.1 is de enthalpie als functie van temperatuur en relatieve vochtigheid uitgezet.

II.3 Wat betreft de invloed die de uitworp van een koeltoren op de omringende atmosfeer heeft, zijn vier gegevens van belang:

- het debiet van de doorstromende lucht
- de opwarming van de doorstromende lucht
- de hoeveelheid waterdamp welke wordt toegevoegd
- de hoeveelheid vloeibaar water welke de koeltoren verlaat

De onder b. en c. genoemde gegevens zijn bij een gegeven hoeveelheid over te dragen warmte nog van elkaar afhankelijk.

In dit verslag zal als voorbeeld een Engels ontwerp gebruikt worden van een koeltoren, die 500 MW aan warmte kan overdragen. Deze toren heeft een luchtdebiet van $8500 \text{ m}^3/\text{s}$ of 11.000 kg/s . Per seconde wordt 500.000 kJ overgedragen aan 11.000 kg lucht. De enthalpietoename van de lucht is dus 45 kJ/kg .

Uit Fig.1 is vervolgens af te lezen dat aangezogen lucht van 0°C en 100% rel. vochtigheid bij een enthalpietoename van 45 kJ/kg de toren zal verlaten bij 19°C , als verondersteld wordt dat de lucht de koeltoren verzadigd verlaat.

Het is overigens niet ondenkbaar dat de lucht de toren met b.v. 25°C en 60% verlaat, omdat theoretisch koeltorens mogelijk zijn, waarin de aangezogen lucht eerst met warmtewisselaars sterk wordt verwarmd, waarna het bovengeschetste natte overdrachtsproces wordt toegepast. In de praktijk wordt gestreefd naar een uitworp van juist verzadigde lucht.

Wat betreft de hoeveelheid vloeibaar water die de toren verlaat, moet onderscheid gemaakt worden tussen condensatie in de uitstromende lucht en het meevoeren van waterdruppels door de luchtstroom. De hoeveelheid water die meegesleurd wordt schijnt gering te zijn. Hoeveel er in de toren al condenseert valt niet te zeggen, als de factoren b en c uit II.3 niet bekend zijn.

III. De verspreiding van warme, vochtige lucht.

III.1 Bij het beantwoorden van de vraag hoe de verspreiding van de uitworp van een koeltoren verloopt, met als uiteindelijk doel het aangeven van een gebied waar mist optreedt, lijkt het de beste weg om gebruik te maken van de theorieën en methoden die werden ontwikkeld in verband met de uitstoting van gassen en deeltjes door schoorstenen. De moeilijkheid die dan eerst moet worden opgelost, is de keuze van de te dispergeren grootheid. Het is namelijk niet verantwoord twee afzonderlijke verspreidingsberekeningen te verrichten voor de temperatuur en de totale waterinhoud van de lucht en dan te beweren dat het gebied waar de relatieve vochtigheid hoger is dan 100% het gezochte mistgebied is. Door het vrijkomen van condensatiewarmte wordt immers de eerstgevonden temperatuurverdeling weer afhankelijk van de gevormde wolk.

III.2 De dispersie van b.v. stof uit een schoorsteen kan opgevat worden als menging van het stof met de omgeving. Bij de uitworp van een koeltoren wordt de lucht uit de omgeving gemengd met lucht die warmer is (dispersie van voelbare warmte), die vochtiger is (dispersie van latente warmte en massa) en die vloeibaar water kan bevatten. In dit rapport wordt er van uitgegaan dat de voelbare warmte, de latente warmte (waterdamp) en de waterdruppeltjes in dezelfde mate gedispergeerd worden, als dit met een gas of stof het geval zou zijn. Dit lijkt gerechtvaardigd daar de dispersie niet wordt bepaald door moleculaire processen, maar door de turbulente bewegingen in de atmosfeer. Afgezien van de sedimentatie van waterdruppels is de enthalpie dan ook bij de dispersie een conservatieve grootheid. Door de enthalpie te gebruiken als de te dispergeren grootheid is tevens de koppeling bereikt tussen de bij de dispersietheorieën optredende grootheden: bronsterkte en concentratie in de lucht. Omdat de koeltoren nu als een enthalpiebron beschreven wordt zijn de in II.3 onder a, b en c genoemde grootheden samengevat als bronsterkte. Het speelt bij het onderhavige probleem dus in feite geen rol of de koeltorenschoorsteen meer of minder goed trekt, met andere woorden, met welk luchtdebiet de enthalpiestroom wordt onderhouden. Vanzelfsprekend speelt het luchtdebiet wel een rol bij het warmteoverdrachtsproces in de koeltoren, zodat wel een bepaald debiet nodig is om voldoende koeling te bewerkstelligen.

IV. Het gebruikte dispersiemodel.

IV.1 Bij de beschrijving van "pluimen" van door schoorstenen uitgeworpen gassen of rook wordt in het algemeen geprobeerd een relatie te leggen tussen de op een bepaalde plaats (coördinaten $x, y, z,$) als gemiddelde over een zekere tijd gemeten concentratie van de verontreiniging en de bronsterkte, de schoorsteenhoogte, het temperatuurverschil van de gassen ten opzichte van de omringende lucht, de schoorsteendiameter en diverse meteorologische parameters, die betrekking hebben op de verspreiding in horizontale en verticale zin van de uitworp. Vertikale en horizontale windfluctuaties, waar het hier om gaat, worden niet op routine basis gemeten onder verschillende weersomstandigheden en op verschillende plaatsen.

Daarom heeft men een methode ontwikkeld om iets te zeggen over de te verwachten gedaante van schoorsteenpluimen met behulp van meteorologische gegevens die wel beschikbaar zijn. (Pasquill 1961, aangevuld door Gifford 1961). Hierbij wordt aangenomen dat in een vertikaal vlak loodrecht op de as van de pluim de horizontale en verticale concentratieverdeling met een Gauss-verdeling beschreven kan worden, met standaarddeviaties σ_y en σ_z . Als h' de hoogte is, waarop de as van de aanvankelijk misschien stijgende pluim horizontaal gaat lopen, dan volgt voor de concentratie X

$$X = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \left\{ e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z-h'}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z+h'}{\sigma_z}\right)^2} \right\}$$

Indien de enthalpie de te dispergeren grootheid is dan kan de bronsterkte Q worden uitgedrukt in J/s en de concentratie in J/m^3 .

De bronsterkte is dus het enthalpie-exces t.o.v. de omgeving en volgt uit het in de koeltoren door het water afgestane vermogen.

Bij de berekening van de enthalpiepluim speelt de hoeveelheid doorgevoerde lucht geen rol; deze grootheid zal in hoofdstuk V. wel nodig blijken bij de vertaling van de enthalpiepluim in stratuswolken en mist.

De tweede term binnen de accolade is de bijdrage ten gevolge van de reflectie van de pluim aan de grond. Er wordt dus aangenomen dat er geen afzetting van druppels of overdracht van warmte aan de grond plaats vindt.

Opgemerkt moet worden dat ten gevolge van het genoemde fluctuerende karakter van windsnelheid en windrichting, de gevonden concentratie als een gemiddelde waarde over bv. 10 minuten beschouwd moet worden.

IV.2 Het verloop van σ_y en σ_z met de afstand is door Pasquill vastgelegd voor 6 verschillende stabiliteitsklassen, A t/m F. Daarbij wordt overdag een van de klassen A t/m D gekozen op grond van de windsnelheid (10 meter hoogte) en de zonnestraling. Voor de nacht worden met behulp van de bedekkingsgraad en de windsnelheid de klassen D t/m F onderscheiden.

Daar stralingsmetingen niet altijd ter beschikking zijn, wordt het criterium zonnenschijn door bedekkingsgraad vervangen.

Nadrukkelijk moet hier opgemerkt worden dat de op deze wijze verkregen resultaten geenszins exact zullen zijn. Vooral voor grote afstanden x wordt het verloop van σ_z met de afstand dubieus: afwijkingen van σ_z tot een factor 2 kunnen voorkomen, zie b.v. F.Fiedler 1969. Ook de keuze van de juiste klasse is een problematische aangelegenheid.

IV.3 In de diffusievergelijking uit IV.1 komt de hoogte h' van de as van de pluim voor. Om deze te kunnen schatten moet rekening gehouden worden met:

- temperatuurexces van de pluim, afhankelijk van de hoogte
- daling van dit temperatuurexces door diffusie en verdamping
- temperatuurverdeling in de atmosfeer
- doorsnede van de schoorsteen
- vertikale uitstroomsnelheid

Vooral door het mogelijk optreden van verdamping en condensatie, is het bepalen van de effectieve schoorsteenhoogte h' bij koeltorens ingewikkelder dan bij normale schoorstenen. Het blijkt echter dat bij toenemende afstand de invloed van de effectieve hoogte h' een steeds geringere rol speelt. Bij dit koeltorenprobleem zijn we juist geïnteresseerd in eventuele lange pluimen, omdat dan wellicht overlast zou kunnen ontstaan.

IV.4 De formule uit IV.1 geldt voor een puntvormige bron. De uitstroomopening van een koeltoren heeft- afhankelijk van het type- een aanmerkelijke afmeting. Een koeltoren van 100 meter hoog kan aan de top een cirkelvormige doorsnede van 60 meter hebben. Getracht is voor deze grote diameter bij de berekening van de pluimen te corrigeren door de x -as zodanig langs zichzelf te verplaatsen dat voor $x=0$ geldt: $\sigma_y=50$ m. en $\sigma_z=25$ m. Voor $x=0$ wordt dus een zekere pluimbreedte aangenomen. De vereiste verplaatsingen van de x -as zijn uiteraard verschillend voor de verticale en horizontale pluimdoorsnede en ook voor de verschillende stabiliteitsklassen.

IV.5 Als voorbeelden van de optredende enthalpiepluimen zijn voor de klassen A, C, E en F verticale en horizontale pluimdoorsneden berekend op de boven aangegeven wijze en met gebruikmaking van de door Pasquill en Gifford gegeven σ_z en σ_y waarden. Deze berekeningen zijn uitgevoerd voor 2 verschillende effectieve schoorsteenhoogten: 100 en 200 m. De resultaten zijn de figuren 2 a t/m d. Deze figuren zijn berekend voor een over de pluim en tijd gemiddelde windsnelheid van 2 m/s. Bij andere windsnelheden moeten de concentraties omgekeerd evenredig met die windsnelheid gewijzigd worden. Door de in IV.2 genoemde onzekerheden moet rekening gehouden worden met een onnauwkeurigheid van een factor twee van de resultaten in fig. 2.

V. Het zichtbare deel van de pluim.

V.1 Is de gedaante van de enthalpiepluim eenmaal bekend, dan kan nog niet zonder meer gezegd worden in welk deel van de pluim vloeibaar water voorkomt. De vorming van een wolk mag beschreven worden als menging van lucht uit de koeltoren met lucht uit de ongestoorde omgeving. In het enthalpie-diagram Fig. 3 worden beide soorten lucht gekarakteriseerd met H_1, T_1 (pluim) en H_e, T_e (omgeving). Nu moet de vraag beantwoord worden, welke punten H, T in het diagram de toestand beschrijven van lucht ontstaan uit menging van willekeurige hoeveelheden lucht uit de pluim en van de omgeving. Indien geen condensatie bij de menging plaats zou vinden, maar een grote oververzadiging gehandhaafd zou kunnen blijven, dan zou het punt H, T in Fig. 3 - in zeer goede benadering- op de rechte door H_e, T_e en H_1, T_1 liggen. Punten op die rechte kunnen met H, T worden aangeduid. In werkelijkheid treedt wel condensatie op. Veronderstel dat w kg/kg condenseert. Dan komt aan latente warmte wL_v Joule vrij, wat in een temperatuurverhoging $\frac{wL_v}{c} ^\circ C$ resulteert. In werkelijkheid zal het punt H, T dan ook op de aangegeven kromme in Fig. 3 liggen.

Deze kromme wordt in goede benadering gekarakteriseerd door de vergelijking

$$T = \bar{T} + \frac{L_o \cdot w}{c_p}$$

Indien de lucht uit de koeltoren H_1, T_1 in een dusdanige verhouding met de omgeving H_e, T_e vermengd wordt dat geen oververzadiging, en dus geen condensatie, optreedt ligt H, T weer op de rechte. De enthalpie H_2, T_2 geeft dus het einde van het zichtbare deel van de pluim aan.

De afmeting van de pluim wordt op deze wijze wat overschat, omdat de waterinhoud nabij de 100% lijn te gering is om waar te nemen, maar de hierbij gemaakte fout speelt geen rol vergeleken bij de andere benaderingen, die bij de pluimberekeningen moeten worden gemaakt.

In Fig. 4 zijn de resultaten van de berekeningen van de snijpunten H_2, T_2 weergegeven voor het geval dat $H_1 - H_e = 45$ kJ/kg. Met dit diagram is $H_2 - H_e$ direkt af te lezen: bij gegeven T_e en f van de omgeving is het enthalpie-exces aan de grens van de pluim aangegeven langs de ordinaat.

Interessant is dat de betreffende lijnen in Fig. 4 vrijwel recht zijn en daarom geldt met goede benadering

$$H_2 - H_e = c(T) \cdot (100 - f)$$

In grafiek brengen van de logaritmen van de hellingen van deze lijnen tegen de temperatuur toont aan dat vrijwel geldt:

$$c(T) = 0,49 \cdot e^{\frac{T}{12,3}}$$

V.2 Resumerend zal nu worden aangegeven op welke wijze de afmeting van de pluimen geschat kan worden.

Zij het in de koeltoren gedissipeerde vermogen Q W bij een zodanige luchttoevoer dat de enthalpietoeename van de lucht 45 kJ/kg is. Als verder de omgeving gekarakteriseerd wordt door een temperatuur $T ^\circ C$, een relatieve vochtigheid $f\%$ en een windsnelheid u m/s dan moet worden uitgerekend:

$$H_2 - H_e \text{ (kJ/m}^3\text{)} = 0,49 \cdot e^{\frac{T}{12,3}} \cdot (100 - f) \cdot \frac{u}{2} \cdot \frac{500 \cdot 10^6}{Q}$$

De verkregen uitkomst geeft aan bij welk enthalpie-exces in de bijbehorende figuur 2 de pluim eindigt als men geen rekening houdt met verticale gradiënten in T, u en f .

De laatste twee factoren in het rechter lid van deze vergelijking zijn toegevoegd om het mogelijk te maken aan de hand van Fig. 2 a t/m d aan te geven op welke afstand van de koeltoren het enthalpie-exces $H_2 - H_e$ bereikt is, bij andere bronsterkte en windsnelheid dan 500 MW en 2 m/s.

VI. Uitgewerkte voorbeelden.

VI.1 Om een indruk te kunnen geven welke afmetingen de koeltorenpluimen kunnen hebben, is een aantal voorbeelden uitgewerkt.

De gewoonlijk beschikbare waarnemingen, de temperatuur en vochtigheid op 1,5 meter hoogte en de windsnelheid op 10 meter hoogte, zeggen weinig over de toestand op 100 meter, waar de verspreiding in hoofdzaak plaats vindt. Eigenlijk zouden meetmastgegevens gebruikt moeten worden.

In Nederland zijn tot nu toe geen vochtigheidsmetingen in masten beschikbaar, zodat de wat onnauwkeuriger radiosondewaarnemingen te De Bilt, wat dit betreft de enige informatiebron in ons land zijn.

Deze metingen vinden plaats rond middernacht en rond het middaguur.

Voor een aantal maanden is uit de beide dagelijkse sondages de waarden van T, f en u op circa 125 meter hoogte geschat met behulp van de oorspronkelijke registraties. De gegevens voor de maanden maart 1969, okt-dec 1969 en januari en februari 1970 zijn hier gebruikt.

VI.2 Tabel I vermeldt de pluimlengten, die voor de onderzochte gevallen verkregen werden met toepassing van de boven beschreven methode. Tevens is de Pasquill -klasse aangegeven zoals die volgt uit de windsnelheid op 10 meter hoogte en de bedekkingsgraad. Zie IV.2.

De gevallen waarbij al van nature mist aanwezig was zijn apart aangegeven. Van belang is op te merken dat lange pluimen vaak in achtereenvolgende nachten optreden.

Verder dient bedacht te worden dat de omstandigheden op 125 meter hoogte niet zo sterk veranderen als aan de grond, zodat de opgegeven pluimlengten representatief geacht kunnen worden voor een groot deel van de betreffende nacht, respectievelijk dag.

In Fig. 5 is de overschrijdingsfrequentie van bepaalde pluimlengten uitgezet, als percentage van het totaal aantal waarnemingen in de genoemde maanden.

Op de vraag of lange pluimen bij voorkeur bij bepaalde windrichtingen voorkomen, is met dit geringe aantal gevallen moeilijk een antwoord te geven.

In de onderzochte maanden waren zuidoostelijke winden het gunstigst voor het ontstaan van lange pluimen.

VI.3 Speciaal in verband met de hinder die een pluim kan veroorzaken is het van belang of die pluim al dan niet de grond bereikt. Uit de figuren 2 blijkt dat de pluim bij een bepaalde stabiliteitsklasse tenminste een bepaalde lengte moet hebben om - bij gegeven effectieve bronhoogte - de grond te raken. De volgende tabel II geeft deze minimale pluimlengten.

<u>Tabel II</u>	<u>lengte in km</u>	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>D</u>	<u>E</u>	<u>F</u>
$h' = 50$ m		0,07	0,13	0,3	0,6	1,1	2,5
100 m		0,3	0,6	1,3	3,3	10	33
150 m		0,5	0,9	2,2	7	24	—

De gevallen, die bij een h' van resp. 50 en 100 m nog pluimen tot aan de grond zouden opleveren zijn in tabel I met één resp. twee kruisjes gemerkt. Bij de interpretatie is het grootste probleem dat we niet weten welke pluimverhoging of verlaging in werkelijkheid moet worden toegekend. De aantallen kruisjes in tabel I wettigen wel het vermoeden dat mist aan de grond bij mechanische - trektorens van 20 à 30 m hoogte vaak zou kunnen optreden, bij hoge natuurlijke -trektorens echter betrekkelijk zelden.

VI.4 Evenals de lengte van de pluim volgt ook de breedte uit de figuren 2 en de waarde $H_2 - H_0$.

Als de maximale pluimlengte op circa 10 km gesteld wordt (klasse F), dan is de breedte van de pluim ten hoogste 600 m. Ook bij de andere stabiliteitsklassen moet op een pluimbreedte van maximaal enkele honderden meters gerekend worden.

VII. Diskussie van de resultaten

- VII.1 Een van de ernstigste bezwaren tegen het gebruikte waarnemingsmateriaal houdt verband met de geringe representativiteit van de windsnelheidsmeting te De Bilt, waardoor Pasquillklasse A en F in De Bilt schijnbaar vaker voorkomen dan op alle andere Nederlandse stations en de klasse D veel minder. Ten gevolge hiervan lopen de lijnen voor "dag" en "nacht" in fig.5 zo ver van elkaar. Gezien de verschillen in voorkomen van de diverse Pasquillklassen tussen De Bilt en andere stations lijken de stippellijnen in fig.5 een betere maatstaf te geven voor de geschatte overschrijdingskans van bepaalde pluimlengten.
- VII.2 Ten aanzien van de in het voorgaande bereikte resultaten spelen nog de volgende mogelijke foutenbronnen een rol:
- a. De stabiliteitsklassen A t/m F zijn een tamelijk ruwe maat voor de optredende dispersie. Zoals eerder opgemerkt zijn afwijkingen tot een faktor 2 te verwachten.
 - b. De grote breedte van de koeltoren vormt een extra complicatie: een groot deel van de uittredende gassen zal aanvankelijk nog niet aan de menging kunnen deelnemen.
 - c. De zichtbare pluim eindigt bij een grotere waterinhoud dan nul, zoals in V.1 werd verondersteld.
 - d. Met vertikale gradienten in T, f en u is geen rekening gehouden. Speciaal ten aanzien van het probleem van het aan de grond optreden van mist (VI.3) kan dit een rol spelen.
 - e. Mogelijkervijze zullen grote druppels uit de pluim vallen. Dit wordt in VII.3 apart behandeld.
 - f. Een grote pluim kan zich - evenals een wolk of een mistbank - 's nachts gedragen als een zichzelf in stand houdend geheel. Door uitstraling kan de pluim afkoelen waardoor condensatie bevordert wordt. Over dit soort processen is moeilijk iets kwantitatiefs te zeggen.
 - g. De onderzochte 6 maanden zijn niet noodzakelijk representatief voor het winterklimaat in Nederland.
- VII.3 Om een schatting te kunnen maken van de mogelijke neerslag uit de pluim van een koeltoren is voor het mengingsproces dat beschreven is in V.1 en geïllustreerd is met fig.3, de hoeveelheid gecondenseerd water $w(g/kg)$ uitgerekend als functie van het enthalpie-exces in de pluim $\Delta H = H - H_e$. Hierbij is in eerste instantie ondersteld dat het water niet uitregent, maar in de pluim blijft. Het resultaat is in fig.6 weergegeven.
- Op grond van metingen in stratuswolken kan worden aangenomen dat neerslagvorming beperkt blijft tot gevallen met w groter dan 0,5 g/kg. Uit fig. 6 en fig. 2 volgt dat precipitatie op zal kunnen treden bij temperaturen rond het nulpunt of lager. Deze neerslag zal tot enkele honderd meters afstand van de koeltoren beperkt blijven. De beschouwing is te kwalitatief om te kunnen besluiten of onder zeer extreme omstandigheden de precipitatie niet tot op een enkele kilometer afstand waarneembaar zal zijn. Verder is het enthalpie-verlies t.g.v. precipitatie zo gering dat het verdere gedrag van de pluim nauwelijks wordt beïnvloed. Ditzelfde kan gezegd worden over het afzetten van mistdruppels aan de grond. De IV.1 aangenomen reflectie aan de grond wordt niet noemenswaard verminderd. De genoemde uitval van water is bij temperaturen onder het vriespunt van belang vanwege het ontstaan van gladheid. Dit verschijnsel kan dus beperkt blijven tot de onmiddellijke omgeving van de toren. Natuurlijk kunnen de pluimen ook op grotere afstand enige gladheid t.g.v. bevroren mistaanslag veroorzaken.

- VII.4 Een belangrijke vraag is nog, hoe de pluim van een koeltoren afhangt van het gedissipeerde vermogen. In V.2 vindt men een formule voor het bij het eind van de pluim behorende enthalpie-exces. Uit de figuren 2 blijkt daarmee dat 's nachts voor een 1000 MW koeltoren de pluim ca 2x langer wordt dan van een 500 MW toren, als in dat laatste geval de pluim langer dan 2 km was. Overdag is de lengtetoeename geringer. Bij kortere pluimen gedurende de nacht is net effect van een dubbel koelvermogen op de pluimafmeting nog veel sterker.
- VII.5 Indien zich op een terrein meerdere torens dicht bij elkaar bevinden dan kunnen soms de pluimen in elkaar overgaan. Bij de berekeningen kan in dat geval een z.g. virtuele bron worden aangenomen. Ter plaatse van het koeltoren-komplex worden dan een grotere σ_y en σ_z aangenomen, overeenkomstig de afmetingen van het terrein. De bron wordt op die wijze in gedachten op enige afstand bovenwinds geplaatst. Dit is dus analoog aan de in IV.4 toegepaste correctie.
- VII.6 Uit de resultaten is geschat dat de kans om in een winternacht met zuid-oostelijke wind op een bepaalde plaats een pluim boven zich te hebben ca 4% is op 1 km afstand en ca 2% op 2 km. Indien dus de pluim aan de grond zou komen (vgl. VI.3) zou de mistfrequentie op ongeveer 1 km afstand ongeveer verdubbeld worden vergeleken met de natuurlijke frequentie van optreden van zichten kleiner dan 200 m gedurende de nacht. In hetzelfde geval zou overigens de kans op zichten kleiner dan 1000 meter veel minder toenemen, nl. met ca 30%.
- VII.7 Bij de hier beschreven resultaten moet bedacht worden dat is uitgegaan van een konstante windrichting. Vooral bij langere pluimen en zwakke winden, zal de windrichting in werkelijkheid variëren. Hierdoor wordt de pluim bijvoorbeeld afgebogen en zal dus niet de berekende lengte bereiken.
- VIII Konklusie
- VIII.1 Een redelijke konklusie wordt weergegeven door de stippellijnen van fig.5. In Nederland - afgezien van het kustgebied - zouden volgens de geschatte berekeningen gedurende de nacht in de wintermaanden pluimen mogelijk zijn tot 10 km lengte. Gedurende 10% van de tijd zijn pluimen langer dan 3 à 4 km mogelijk en in de helft van de tijd langer dan 200 m. Overdag in de wintermaanden zouden pluimlengten tot 2 km voor kunnen komen 10% van de tijd zijn de pluimen langer dan ca 700 meter en mogelijk 50% van de tijd langer dan 100 meter. Deze konklusie moet - gezien de in VII.2 genoemde bedenkingen - met voorzichtigheid worden gehanteerd. Toetsing aan de praktijk verdient stellig aanbeveling.
- VIII.2 In de winter zal 's nachts bij een effectieve koeltoren-hoogte van 50 meter ongeveer de helft van de pluimen met lengten groter dan 200 meter aan de grond komen. Bij pluimen langer dan 3 km is dit steeds het geval. Bij een effectieve koeltoren-hoogte van 100 meter zal de pluim slechts zelden aan de grond komen. De relatie tussen de werkelijke- en de effectieve koeltorenhoogte wordt in dit rapport niet besproken.
- VIII.3 Neerslag kan een koeltoren binnen een afstand van enkele honderden meters veroorzaken. Bij vorst moet in dat gebied en bovendien in de zone waar de pluim de grond bereikt, met gladheid rekening gehouden worden.

Referentias

1. A. Blum
Drizzle Precipitation from Water Cooling Towers
The Engineer (1948) p.128
2. K.G.Baker
Water Cooling Tower Plumes
Chem. and Process Engineering jan.1967 p.56
3. Travelers Research Corp.
Climatic effects of a Natural draft Cooling Tower
Davis-Besse Nuclear Plant (oct.1969)
4. E.Aynsley
Cooling-tower effects: Studies abound,Electrical
world. May 11.1970, p.42
5. E.Wendell Hewson
Moisture pollution of the atmosphere by cooling
towers and cooling ponds.
Bull of the Am.Met.Soc. 51 (1970) p.21
6. William P.Lowry
Environmental effects of nuclear cooling facilities
Bull of the Am.Met.Soc. 51 (1970) p.23
7. F.Pasquill
The estimation of the dispersion of windborne
material
Met.Mag. 90 p.33 (1961)
8. F.A.Gifford
Uses of routine meteor.observations for estimating
atmosph.dispersion
Nuclear Safety 2 (1961) p.47
9. F.Fiedler
Untersuchungen über die Ausbreitung von atmosphärische
Eigenschaften und Luftbeimengungen
Beitr.z. Phys.d. Atm. 42 (1969) p.143

datum	middag-sonde					avond/nacht-sonde						
	okt. '69	nov. '69	dec. '69	jan. '70	feb. '70	mrt. '69	okt. '69	nov. '69	dec. '69	jan. '70	feb. '70	mrt. '69
1			≡	B x 0,3	C x 0,4	C 0,1	F 0,2			E x 2,9		D x 0,2
2		D x 0,1	C 0,2	C x 0,4	C x 0,4		F x 3,0			D 0,2		
3			C 0,1	A x 0,2						F 1,9	E 0,3	
4			C x 0,5	B x 0,5	C 0,2					F x 6,0	F 0,9	F x 6,8
5			C 0,2	D x 0,9	C 0,2					E 0,6	F	F x 19
6			B x 0,5	D 0,1	C x 0,7					E 1,7	E 0,2	
7												
8			A x 0,1	C x 0,5	C x 0,7		F x 3,6			E 0,8	E x 1,2	F 2,3
9					C 0,1		F x 4,1			E 0,4	E x 2,9	
10					C 0,2		D 0,1				F x 6,0	E 0,3
11				B x 0,4	C 0,1							E x 1,6
12				B x 0,4	C x 0,2							E x 0,3
13				B x 0,4	Bxx 0,6		F 0,4			F x 5,1	F x 13	D x 0,6
14			D x 0,4	Cxx 1,4	D 0,3		F x 4,6			E x 2,0	F x 8,5	E 0,1
15			C x 0,2		C 0,1					E 0,4	E x 7,4	
16			C x 0,5	Cxx 1,7	B x 0,2					E 1,5	F x 9,8	
17			C 0,2	C 0,1	D 0,2		F 0,7			E 1,0	F x 15	
18			B x 0,2	C 0,2	D 0,2		F 1,9			E 0,2	F x 17	
19			B x 0,4	C 0,2	Cxx 1,3					E x 1,9	D x 1,3	
20			B x 0,2	Axx 0,3	B x 0,3		F x 7,7			F x 4	D 0,4	
21	B x 0,1	C x 0,2	C x 0,5	C x 0,4						D 0,2		
22		C x 0,2		C x 0,2						E x 2,5	D 0,4	
23				C x 0,9	C x 0,3					D 0,3	E 0,2	
24					C 0,1					E x 6,0	E x 3,1	
25		C x 0,3	C x 0,4							E x 3,3	F x 20	
26		C x 0,3	B x 0,1							E x 1,3	E 1,0	
27			C x 0,3	C x 0,4	C 0,3					F x 15		E 0,5
28			C 0,2							E 0,7	F x 5,3	
29			C 0,2							F 1,4	E 0,8	
30		Bxx 0,7		C x 0,3						F x 2,6	F x 5,0	
31				B x 0,5								w

Tabel I Uit radiosonde-gegevens van De Bilt berekende pluimlengten (km) groter dan 100 m.

≡ = al mist aanwezig

w = waarneming ontbreekt

x. resp. xx: de pluim reikt tot de grond bij hⁱ = 50 resp. 100 m. Zie VI.3.

Fig. 1. Enthalpie H van vochtige lucht, uitgedrukt in kJ per kg droge lucht, als functie van temperatuur T(°C) en relatieve vochtigheid (%).

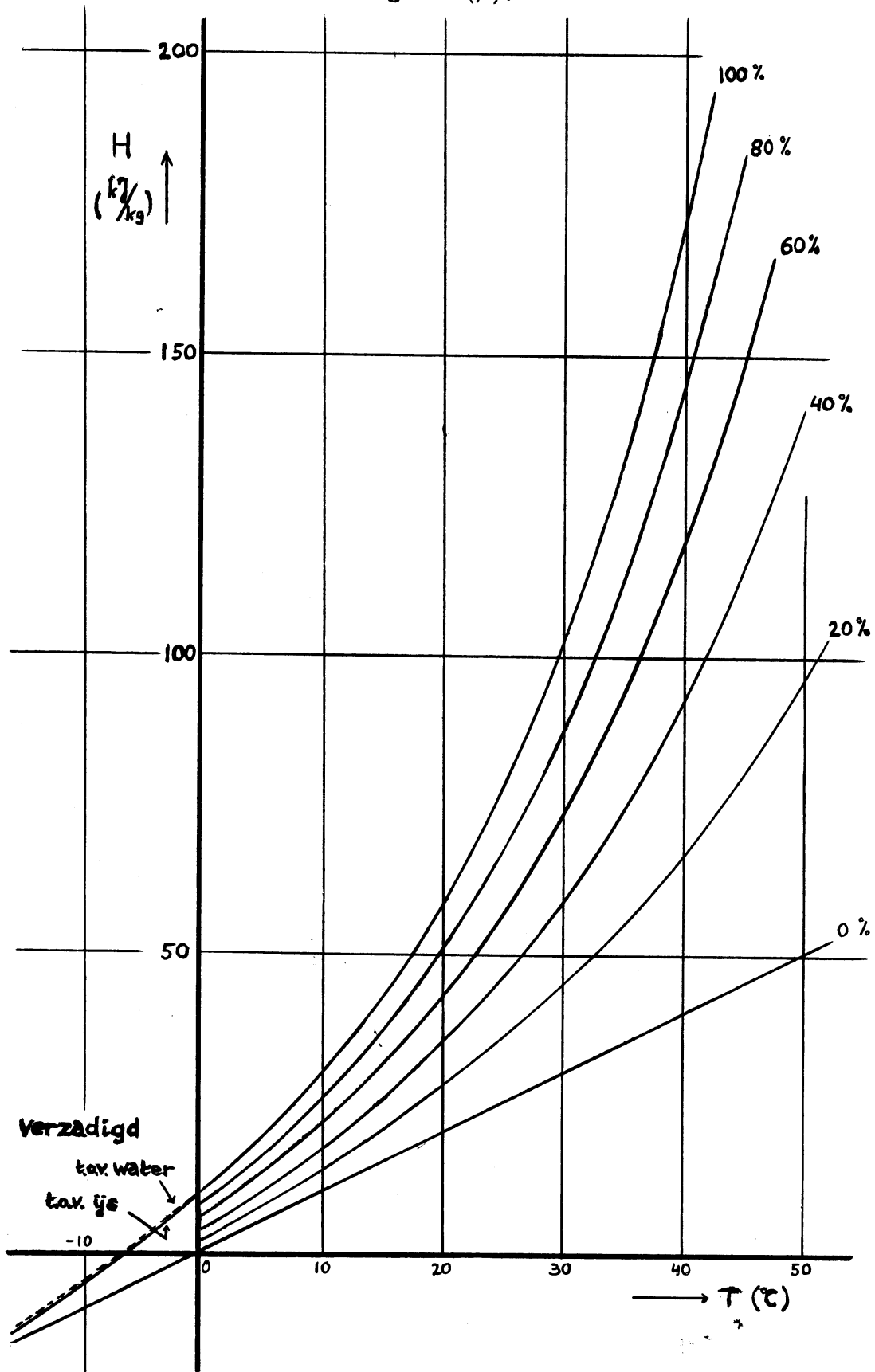
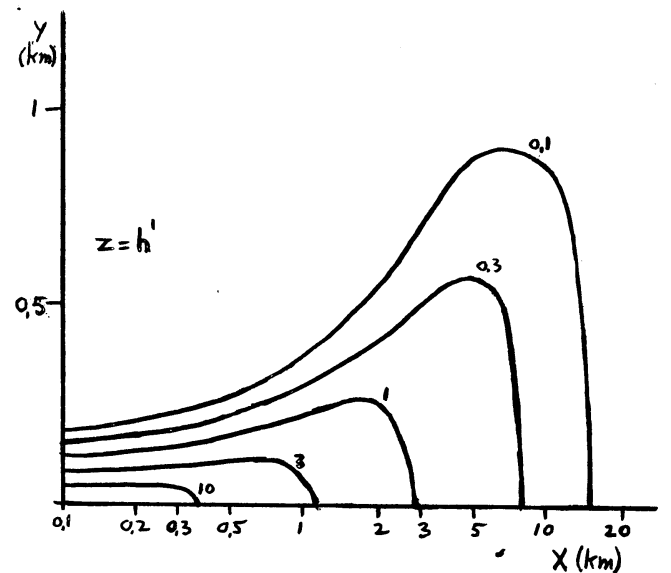
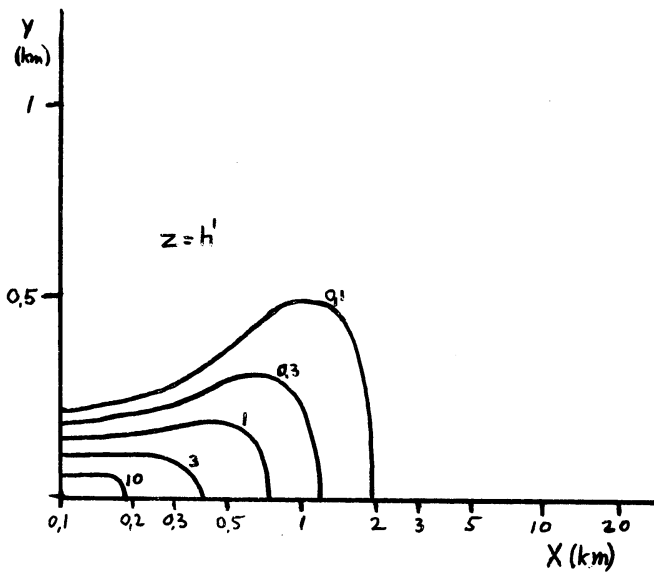
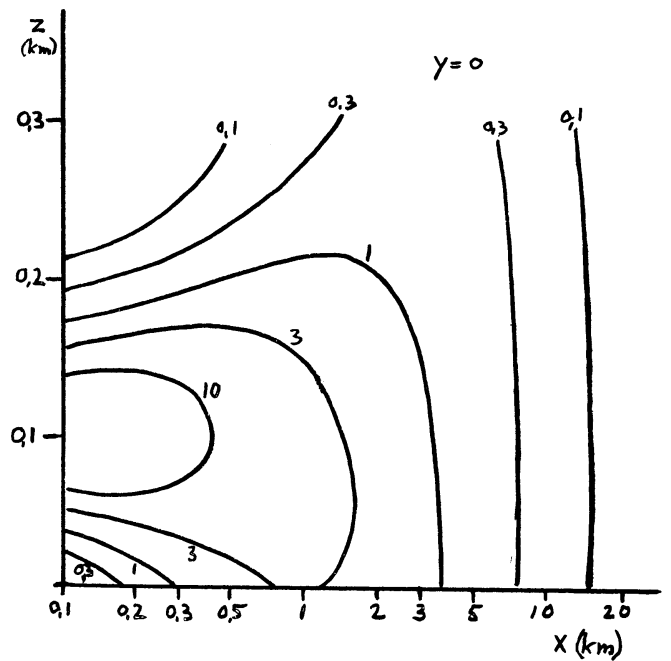
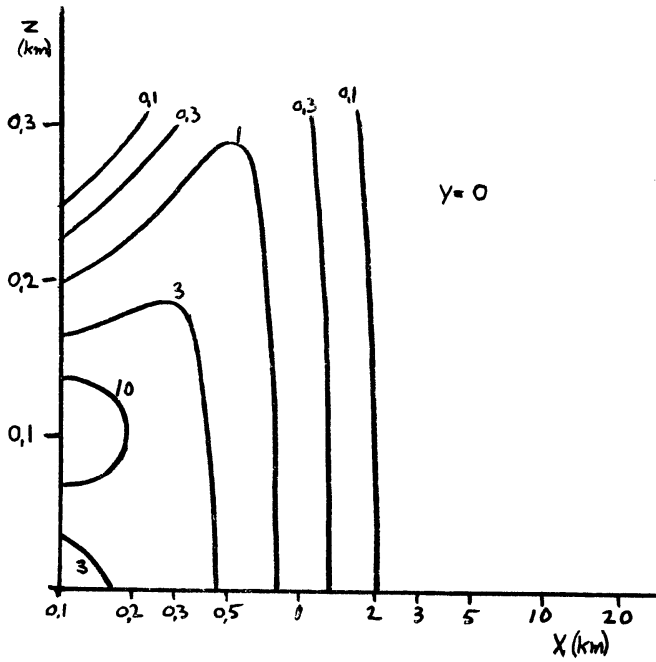
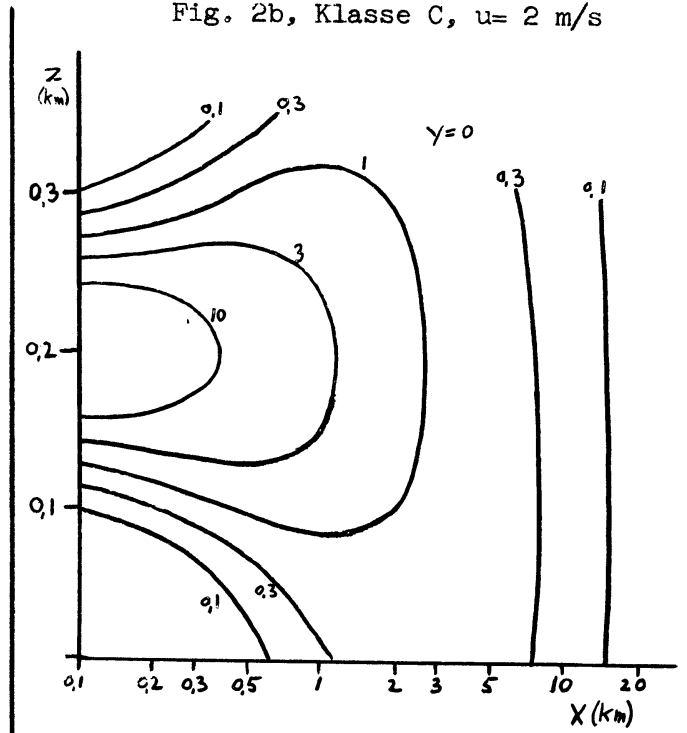
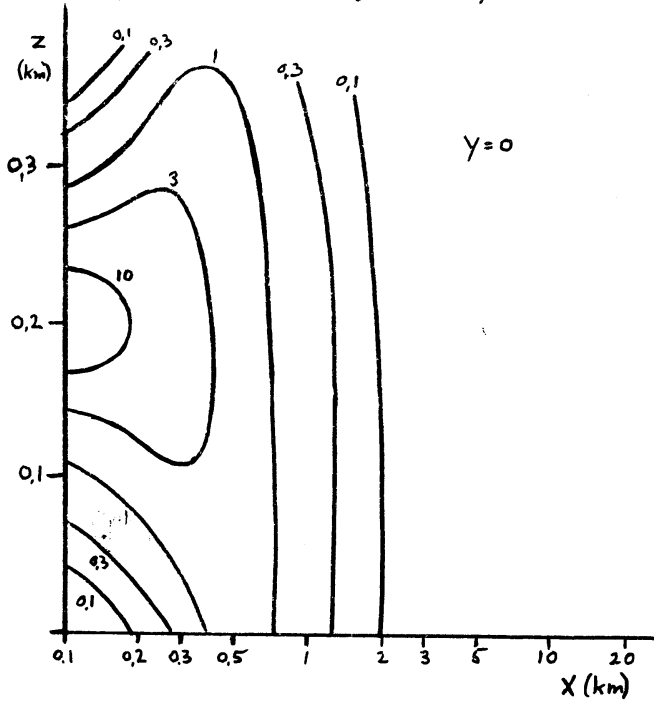


Fig. 2a, Klasse A, $u = 2$ m/s

Fig. 2b, Klasse C, $u = 2$ m/s



Toelichting op blz. 15.

Fig. 2c, Klasse E, $u = 2$ m/s

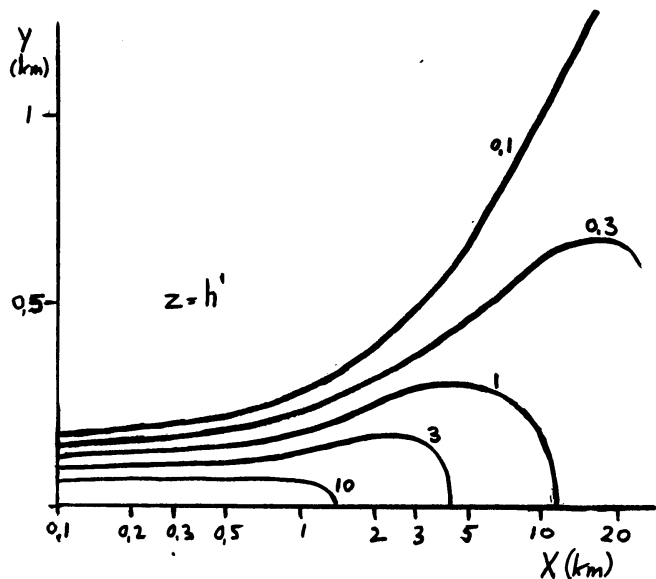
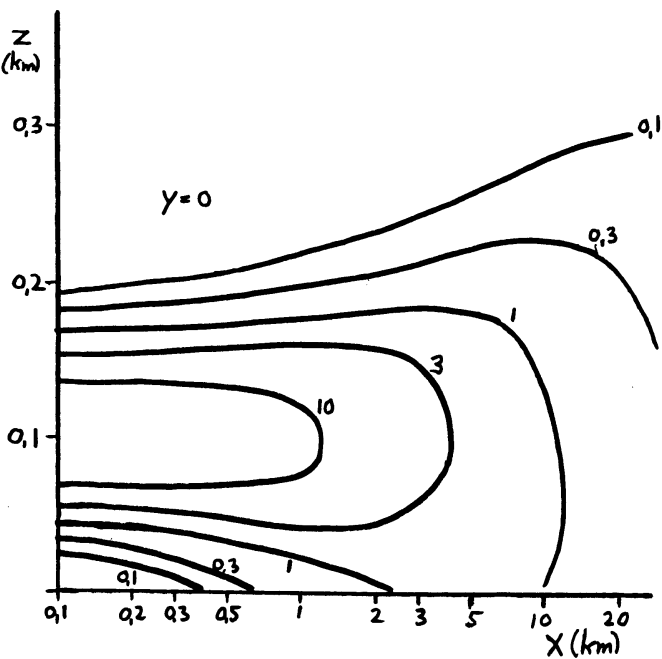
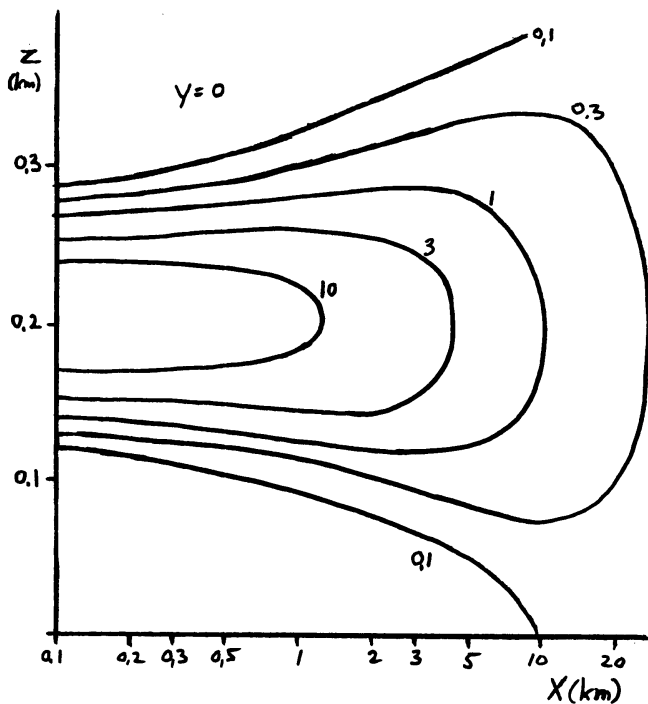
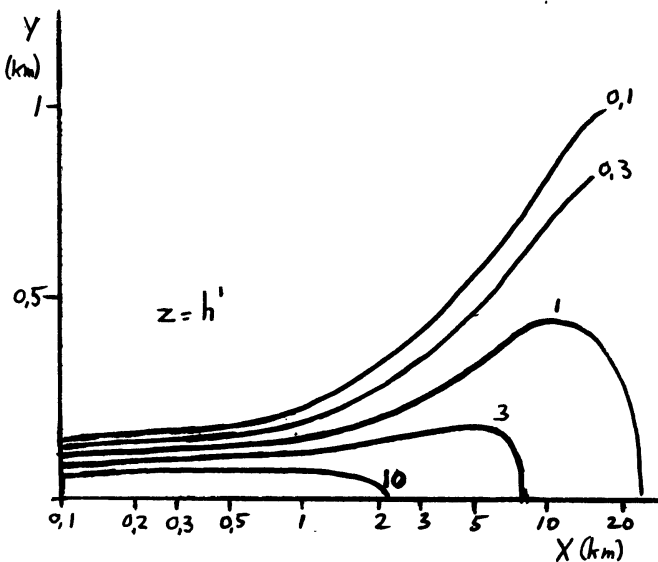
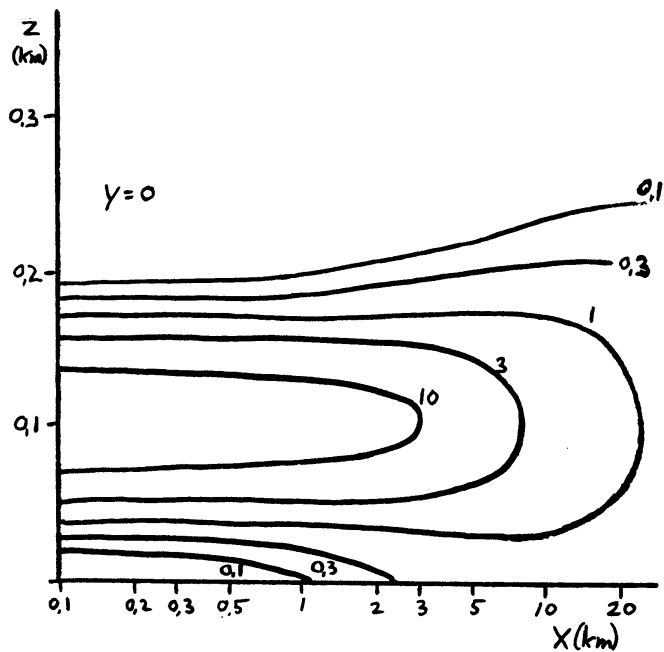
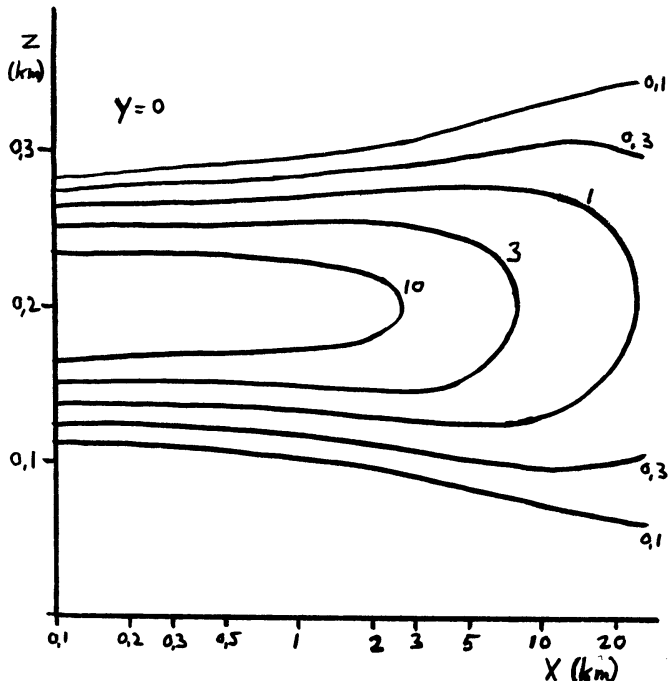


Fig. 2d, Klasse F, $u = 2$ m/s



Bij Fig. 2 at/m d, resp. voor Pasquill-klassen A, C, E en F. Uitgezet is het enthalpie-exces t.o.v. de omgeving, uitgedrukt in kJ/m^3 voor een 500 MW koeltoren.

De bovenste rij figuren geeft verticale doorsneden door de as van de pluim voor een effectieve bronhoogte van 200 m., de middelste rij hetzelfde voor 100 m. De onderste rij figuren geeft horizontale doorsneden door de as van de pluim. Alle figuren gelden voor een windsnelheid van 2 m/s, hoewel klasse A eigenlijk uitsluitend bij lagere windsnelheden optreedt.

Fig. 3 Menging van de koeltorenuitworp met de omringende lucht, afgebeeld in een H,T-diagram.

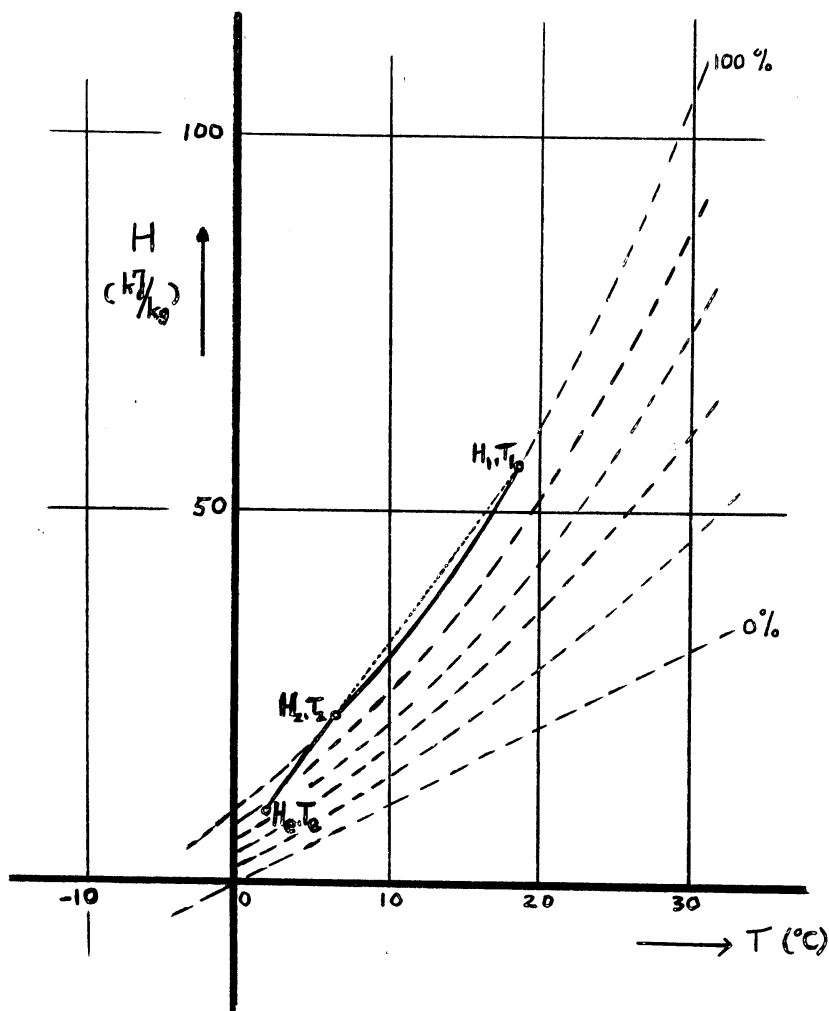


Fig. 4 Enthalpie-exces (H_2-H_e) voor de grens van de zichtbare pluim van een koeltoren die de enthalpie van de doorstromende lucht verhoogt met 57 kJ/m^3 in een omgeving met temperatuur T en relatieve vochtigheid f .

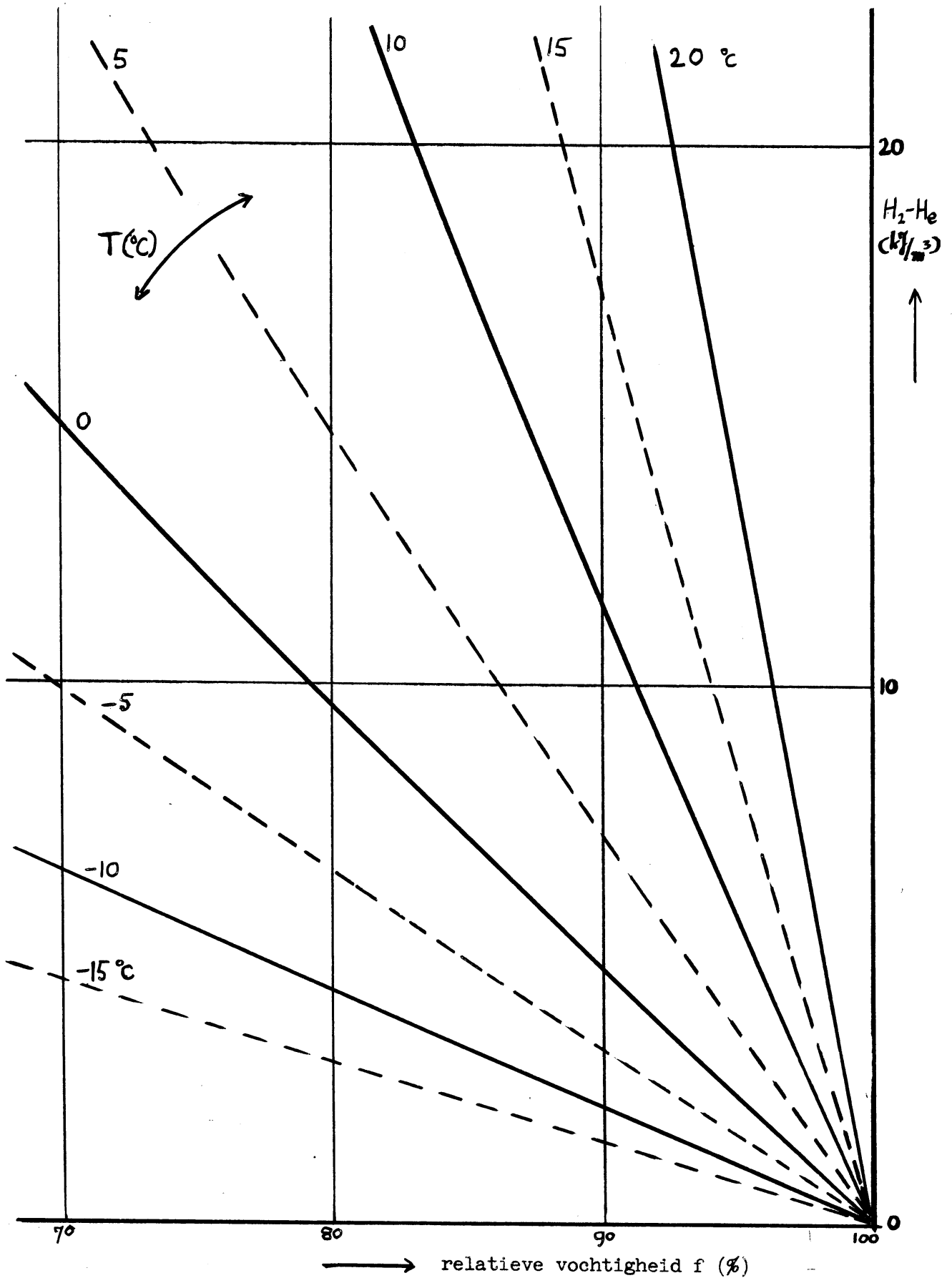


Fig. 5. Schatting van de overschrijdingskans P als functie van de pluimlengte voor 6 wintermaanden te De Bilt. Zie in tekst VI en VII.

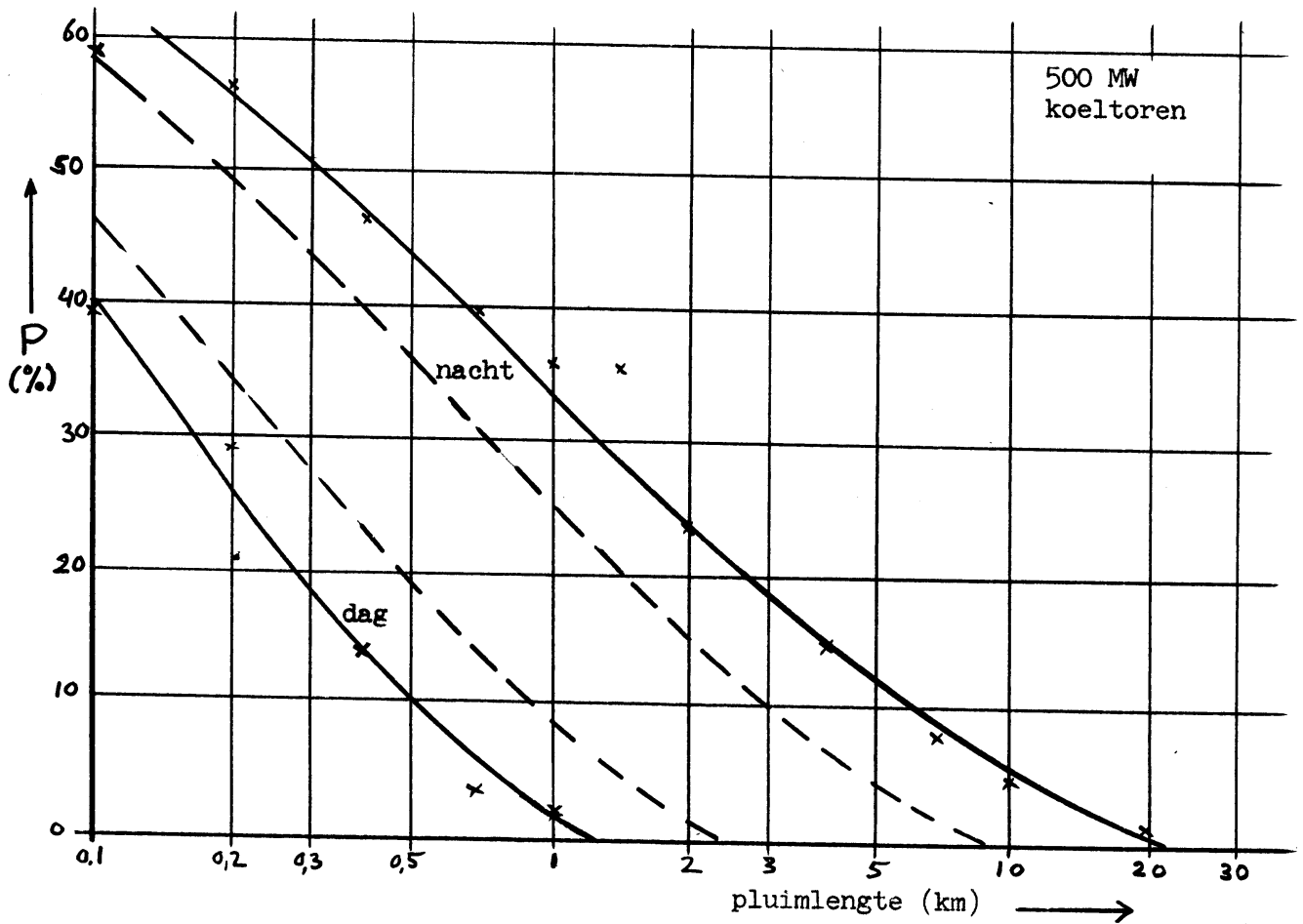


Fig. 6. Hoeveelheid gekondenseerd water als functie van het enthalpie-exces ΔH in de pluim als de omgeving verzadigde lucht is bij -10° , 0° en $+10^\circ\text{C}$.

