

KONINKLIJK NEDERLANDS  
METEOROLOGISCH INSTITUUT

De Bilt

WETENSCHAPPELIJK RAPPORT

W.R. 76-8

H.R.A. Wessels

Vochtigheidsmetingen op 200 m hoogte  
toegepast op het schatten van de  
lengte van koeltorenpluimen

De Bilt, 1976

Publikationsnummer: K.N.M.I. W.R. 76-8 (MO-B)

U.D.C.: 551.501.771 :  
551.551 :  
551.507.7

### Summary:

(Measurements of humidity at a height of 200 meters. Application of these measurements to the estimation of the plume-lengths of cooling towers).

During 1973 humidity measurements were carried out along the meteorological 200 meter tower at Cabauw (the Netherlands). The instruments used were hair-hygrographs. In this report the measurements at a height of 208 m are analyzed and compared with simultaneous measurements near the foot of the tower at the standard height of  $1\frac{1}{2}$  m. Especially during the night the relative humidity will be smaller with increasing height (figures 1 and 2). On quite a few occasions the relative humidity at the top of the tower dropped to values below 10 or 20 % in air subsiding above a low level inversion, whereas at the same time nothing particular happened near the ground.

Simultaneous measurements of relative humidity and temperature during 1973 are used to study the behaviour of the absolute humidity at 208 m and  $1\frac{1}{2}$  m. The mixing ratio is highest near the surface level. Of course the vertical gradient of the mixing ratio is connected with the evaporation process. The well-known daily variation with two maxima, present near the ground, has almost disappeared at a height of 208 m. (fig. 3).

In the final section of this report the tower measurements are used as input data in the model developed by Wessels and Wisse (1971) for the estimation of the length of cooling tower plumes.

The one-year climatology of cooling tower plumes presented here is more complete and more accurate than previous estimates based on twice-daily radiosonde observations. It should be stressed however that the accuracy of the method is also limited by several crude approximations of the model.

An interesting result is the preference of plumes to occur in the north-easterly direction. (fig. 9). In this plume-climatology all plumes are excluded that would not be clearly visible from the ground, due to the presence of fog or low clouds. Criteria for

the exclusion are provided for by transmissometers. These instruments measure the visibility at several levels along the 200 m tower.

Unfortunately, there has been no opportunity to compare these results with observations.

-o-o-o-

Vochtigheidsmetingen op 200 m hoogte  
toegepast op het schatten van de  
lengte van koeltorenpluimen

1. Inleiding

Sinds december 1972 is langs de meetmast van het KNMI te Cabauw op enkele hoogten de relatieve vochtigheid geregistreerd met behulp van hygrografen. Aangevuld met het routine-programma van de meetmast kwamen daarmee simultane gegevens van temperatuur, relatieve vochtigheid en windsnelheid ter beschikking. De combinatie van deze grootheden, alsmede de stabiliteit, bepaalt welke lengte de pluim van een koeltoren bij een gegeven warmteafgifte kan hebben. Een theoretisch model, dat een pluimschatting oplevert, is beschreven door Wessels en Wisse (1971). Voert men een dergelijke berekening voor een lange reeks meteorologische gegevens uit, dan kan een klimatologie van pluimlengten worden verkregen.

Het ontstaan van de pluim wordt bepaald door het mengen van warme, vochtige lucht die boven uit de koeltoren stroomt, met ongestoorde lucht van niveaus even boven de koeltoren, dat wil zeggen boven ca. 100 meter hoogte. In het algemeen worden op die hoogte slechts metingen met radiosondes verricht. Dit gebeurt echter maar twee keer per etmaal met een geringe nauwkeurigheid. In de eerdergenoemde publikatie zijn radiosondemetingen gebruikt om een eerste indruk van optredende pluimlengten bij een in Nederland te bouwen koeltoren te kunnen geven. Het thans aanwezige waarnemingsmateriaal is aanmerkelijk betrouwbaarder en laat voorts toe om de dagelijkse gang van de pluimlengte te beschrijven.

Behalve aan theoretisch geschatte pluimlengten wordt in dit rapport aandacht geschonken aan de dagelijkse en jaarlijkse gang van de relatieve en de absolute vochtigheid op 208 m hoogte. Het begrip relatieve vochtigheid zal in het volgende meestal tot RV worden afgekort.

## 2. De metingen

### 2.1 Keuze van de apparatuur

In verband met van het KNMI verwachte adviezen over de meteorologische gevolgen van grote koeltorens in Nederland, moesten op korte termijn waarnemingen nabij 200 m hoogte beschikbaar komen. In tegenstelling tot wind en temperatuur behoorde de vochtigheid niet tot de gegevens van het meetprogramma, dat na de opening van de meetmast in november 1972 zou gaan draaien.

Omdat juist bij lage temperatuur (en hoge RV) de langste pluimen voorkomen, moest van de apparatuur een voldoende nauwkeurigheid bij temperaturen onder 0° C worden gevraagd. De meeste meetmethoden geven onder die omstandigheden echter grote moeilijkheden. Ook psychrometers, zoals vermoedelijk t.z.t. in de Cabauw-mast zullen worden geïnstalleerd, zijn onder het vriespunt niet betrouwbaar, dan wel slechts ten koste van ingewikkelde extra voorzieningen te gebruiken.

Tijdens de inspanning, die nodig was om de 200 meter-mast-instrumentatie op gang te krijgen, bestond geen gelegenheid aan dit probleem voldoende aandacht te schenken. Daarom werd besloten de vochtmetingen voorlopig met haarhygrografen uit te voeren, in het bewustzijn dat van de resultaten geen hoge betrouwbaarheid te verwachten zou zijn. Omdat het verwisselen van stroken niet dagelijks kon worden verricht, werden hygrografen met weekstroken gebruikt.

### 2.2 Haarhygrometrie

Over dit onderwerp is een uitgebreide literatuur beschikbaar. In het algemeen kan worden gesteld dat het gedrag van (al dan niet geprepareerde) haren of haarbundels onder invloed van de RV vrij goed bekend is. De fouten, die de meest nadelige invloed op de nauwkeurigheid hebben, zijn in volgorde van belangrijkheid:

a. Hysteresis. Een haar, die zich enige tijd in droge lucht bevindt ( $RV < 35\%$ ), zal indien vervolgens de RV stijgt, te hoog aanwijzen. Voorbeelden zijn te vinden bij Davey (1965) en Müller (1965). Deze fout kan tot 10 à 15 % in RV oplopen. Het effect wordt

opgeheven als de RV gedurende enige tijd boven ca. 95 % blijft of als de haar wordt nat gemaakt. Men kan het verschijnsel ook als volgt omschrijven: bij het verband tussen aanwijzing, d.w.z. lengte van de haar, en RV kan men van twee calibratiekrommen spreken, een natte en een droge. Eerstgenoemde wordt uitgaande van de vochtige toestand doorlopen, terwijl de droge geldt na verblijf van de haar in droge lucht. De schaalverdeling van de instrumenten is gebaseerd op de natte calibratiekromme, zodat de instrumenten correct zullen aanwijzen, tenzij de RV gedurende enige uren te laag is geweest (gebruik binnenshuis is daarom problematisch). Ook om andere reden is het optreden van grote droogte schadelijk voor het instrument, want beneden ca. 20 % schijnen zelfs onomkeerbare wijzigingen van de calibratie op te treden (Hickmann, 1970). Zeker nabij de grond komt in de meeste nachten de RV in ons land wel boven de 95 %, zodat hysteresis-fouten in het algemeen van korte duur zullen zijn. Op 208 meter is de situatie minder gunstig, zoals later uit de figuren 1 en 2 zal blijken. Uit inspectie van de stroken uit 1973 ontstond overigens de indruk dat hysteresis bij dit project slechts af en toe een rol heeft gespeeld. Correctie is vrijwel onmogelijk en is dus niet toegepast.

b. Traagheid. Dit is vooral een handicap bij toepassing van het haar als radiosonde-meetelement. Men kan hierbij denken aan tijdconstanten in de orde van enkele minuten, maar bij temperaturen van ca.  $-10^{\circ}$  C wel van ca. een half uur.

c. Temperatuurfout. Deze hangt gedeeltelijk van de bevestiging af. Per  $10^{\circ}$  C temperatuurverandering worden wel fouten van enkele procenten in de RV opgegeven. Volgens Byers (1974) treedt bij hogere vochtigheid een grotere fout op. Misschien hangt dit samen met de geringere gevoeligheid (uitslag per % RV) van haren boven 95 % RV.

### 2.3 Opstelling van de instrumenten

De inrichting van de 200m-mast zal t.z.t. in minder specifieke verslagen uitvoerig worden beschreven. Hier worden slechts de voor dit rapport belangrijke punten vermeld.

De zg. 200m-mast is een 213 m hoge cylinder met een doorsnede van 2 m. De meeste instrumenten bevinden zich op ca. 10 m afstand van de as van de cylinder aan het einde van zg. uithouders. Die uithouders zijn opklapbare vakwerkarmen, die dienen om de instrumenten buiten het door de mast verstoorte gebied te kunnen opstellen. Er zijn tien meetniveaus met elk drie van dergelijke uithouders. Zo bevinden zich op 80 m en 200 m hoogte geventileerde elektrische thermometers aan de zuidoostelijke uithouders. Windsnelheid en -richting worden op alle drie de uithouders van de genoemde niveaus gemeten, maar gebruikt wordt slechts de waarneming die ten opzichte van de mast bovenwinds is.

De hygrografen (type Fuess) waren voor dit projekt opgesteld in dubbelwandige houten kistjes (buitenafmeting: 460 mm breed, 360 mm diep, 360 mm hoog) met als bescherming tegen de regen een deksel dat enkele centimeters uitsteekt. De hygrografen zijn bereikbaar na optillen van dit deksel en nog een binnendeksel. In zowel binnen- als buitenwand bevinden zich ca. 80 gaten van 20 mm doorsnede, die dienen om de instrumenten zo goed mogelijk in contact met de buitenlucht te brengen. De kistjes waren wit geschilderd.

Deze kistjes hingen aan de zuidzuidoost-zijde van de mast aan de buitenzijde van de leuning van een balkon (uitgevoerd in open vakwerk-constructie) op ongeveer 1 meter van de buitenwand van de mast. Op deze wijze werden hygrografen opgesteld op 88 m en 208 m hoogte.

Bovendien werd een tweetal hygrografen alsmede een droge en natte thermometer geplaatst in een Stevenson-hut, dus op ca. 1½ m hoogte, op ca. 55 m afstand van de as van de hoofdmast in zuidelijke richting.

De extra hygrograaf op 1½ m hoogte was nodig omdat de instrumenten van 88 en 208 m regelmatig gedurende een of meer weken in de hut werden geplaatst teneinde ze met de vaste hygrograaf op 1½ m hoogte te kunnen vergelijken. Met het extra instrument kon in die



periode de meting boven in de mast worden gecontinueerd. Gedurende het meetjaar 1973 werd voor het 1½ m-niveau steeds dezelfde hygrograaf gebruikt, te weten nr. "29" volgens de KNMI-administratie. Op 88 en 208 m waren voor driekwart van de tijd resp. "62" en "85" in gebruik. De resterende metingen op die hoogten werden grotendeels met instrument "58" verkregen.

## 2.4 Resultaten van ijkingen en vergelijkingen

### 2.4.1 Ijkingen in het laboratorium

Dit betreft een standaardprocedure, die op alle gerevideerde hygrografen wordt toegepast: vergelijking in een ijkkast onder diverse omstandigheden met een geventileerde droge en natte thermometer. Het instrument wordt dan voor een RV nabij 100 % correct afgeregeld en vervolgens wordt gecontroleerd of dan de fout bij lage RV binnen enkele procenten blijft. Alle 4 instrumenten waren gedurende 1972 aldus afgesteld.

In dit ijkvat is nog geprobeerd hygrograaf "58" nauwkeuriger te calibreren, maar de opstelling bleek onvoldoende voor dit doel. Wel kon worden geconcludeerd dat de schaal boven 94 % te veel samengedrongen was en dat de hygrograaf rond 50 % enkele procenten hoger wees dan de psychrometer.

### 2.4.2 Onderlinge vergelijking van de schalen en van de afwijkingen bij 100 % RV

Bij de periodieke vergelijkingen in de Stevenson-hut werd instrument "29" als standaard gekozen. Per week werd een waarde vastgesteld van de onderlinge verschillen in aanwijzing van twee naast elkaar staande hygrografen bij een uitslag van ca. 100 %, 90 %, 80 %, 70 % en 50 % op instrument "29".

Voor alle instrumenten werd voorts wekelijks nagegaan of bij mist of lage wolken (eventueel met de zichtmeters van de Cabauw-mast vast te stellen) de aanwijzing al dan niet 100 % bedroeg.

De aldus wekelijks verkregen afwijkingen werden gebruikt om voor langere perioden correcties vast te stellen, zodat de schalen bij 100 % zo goed mogelijk kloppend zouden zijn en hygrograaf "29"

als standaard voor de rest van de schaal kon dienen. Er tekenden zich drie perioden af waarbinnen de correcties niet te veel waren verlopen. De overgang tussen die perioden was op 15 mei en 16 oktober. Deze perioden zijn misschien te verklaren uit een temperatuurafwijking (afzonderlijke correcties voor zomermaanden) en uit een veroudering van het mechanische gedeelte ofwel van de haareigenschappen. Vooral "62" bleek sterk verlopende correcties te vertonen. Om die reden zijn de resultaten voor het 80m-niveau in het volgende niet verwerkt.

#### 2.4.3 Vergelijking van instrument "29" met een psychrometer

Deze vergelijking werd eens per week uitgevoerd met ingang van 2 mei 1973. Een eerste meting werd verricht tussen ca. 0830 en 0900 gmt en een tweede ca. 2 uur later, meestal onder drogere condities. Na bevochtiging van de natte bol werd de hut nog enkele minuten gesloten en vervolgens weer geopend voor aflezing van de thermometers en voor het geven van merkstrepen op de hydrograafstroken. De aflezingen van "29" werden met de bovengenoemde periode-afwijkingen gecorrigeerd.

Bij het schatten van de relatieve vochtigheid met een ongeventileerde psychrometer doet zich een probleem voor. Het gemeten droog-nat-verschil  $\Delta T$  moet worden gecorrigeerd vanwege de onvoldoende ventilatie. Dit komt neer op het introduceren van een constante  $A > 1$  in de psychrometerformule voor het verschil tussen de verzadigingsdampspanning bij de nattebol-temperatuur en de actuele dampspanning:

$$\Delta e \text{ (mb)} = A \cdot \frac{c_p}{\epsilon L} \cdot p \text{ (mb)} \cdot \Delta T \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Hierin is  $p$  de luchtdruk,  $c_p$  de soortelijke warmte van lucht,  $L$  de verdampingswarmte van water en  $\epsilon$  het quotiënt van de molaire massa's van water en lucht.

Ten behoeve van dit onderzoek is een psychometertafel gebruikt, die overeenkomt met het toepassen van  $A = 1.21$  in bovenstaande formule. Een dergelijke  $A$  wordt vaak gebruikt voor Stevenson-hutten.

Door de beschreven correcties is ervoor gezorgd dat beide vochtmetingen bij 100 % samenvallen. Daarom is verder gelet op verschillen wat betreft (100-RV). Uit 77 waarnemingen volgde met een spreiding van 3.5 % in de RV:

$$(100-RV)_{\text{psychr.}} = 1.062 (100-RV)_{\text{"29"}}$$

Beschouwt men 16 gevallen met zwakke wind, d.w.z.  $\leq 2\frac{1}{2}$  m/s, afzonderlijk, dan volgt een evenredigheidsfactor 1.036. Het lijkt aannemelijk dat bij toenemende wind een iets te hoge A is gebruikt en dus de (100-RV) met de psychrometer iets werd overschat. Bij de temperaturen, die tijdens deze waarnemingen ongeveer heersten, levert 10 % verandering van A een verandering van (100-RV) met ca. 4 % op.

De onzekerheid wat betreft de te kiezen A maakt conclusies moeilijk. Vergelijking met een goed geventileerde psychrometer had dan ook de voorkeur verdiend. Zo'n vergelijking heeft na installatie van enige psychrometers te Cabauw in maart 1974 inderdaad plaatsgevonden en bevestigde bovenstaand resultaat. Hierbij moet echter wel worden opgemerkt dat deze late vergelijking aan waarde verliest, omdat de veroudering van de hygrograaf inmiddels verder was voortgeschreden.

Een complicatie bij dit soort vergelijkingen vormt de traagheid van de hygrograaf (al dan niet met inbegrip van de behuizing). Tijdens de vergelijkingen werd het meestal droger, zodat hierdoor (100-RV) kan zijn onderschat. Uit dit alles kan de voorzichtige conclusie worden getrokken dat de hygrografen (100-RV) misschien enkele procenten te laag hebben geschat, maar dat een gefundeerde correctie niet is gevonden.

## 2.5 Bewerking van het materiaal

Weekstroken laten geen nauwkeurige tijdschatting toe. Onregelmatige gang van het uurwerk is nauwelijks te vermijden. In verband met eventuele rek en krimp van het papier is sinds 5 juni diagrampapier gebruikt met gemetalliseerde achterzijde. Uiteraard zijn de tijdmarkeringen aan begin en einde van de strook bij de bewerking in rekening gebracht. De RV verandert soms zo snel, dat fouten van

enkele minuten al afleesfouten van procenten in de RV opleveren.

Om deze foutenbron enigszins te ontlopen, zijn uurgemiddelden geschat (1 uur is op de strook 1.7 mm). Dit is zo gedaan voor acht uurvakken per dag teneinde de dagelijkse gang te kunnen volgen. De uurvakken zijn 02-03 uur, 05-06 uur, ....., 23-24 uur gmt. Uurgemiddelden van de temperatuur op 200, 80 en 2 m en van de windsnelheid op 200 en 80 m waren uit de routineregistratie voor vrijwel het gehele jaar beschikbaar.

## 2.6 Meetfouten

Uit 2.2 en 2.4 blijkt dat deze RV-metingen niet beter dan tot op enkele procenten te vertrouwen zijn. Ook tijdfouten (2.5) kunnen soms tot een dergelijke onzekerheid leiden.

Bij berekening van de absolute vochtigheid en bij schatting van koeltorenpluimen spelen ook fouten in de temperatuurmeting een rol. Vooral in de ochtenduren bij afnemende vochtigheid kunnen nat geworden thermometers nog gedurende enige tijd te laag aanwijzen. Een fout in de absolute vochtigheid, die hierdoor kan ontstaan, wordt misschien wat gecompenseerd door de omstandigheid dat terzelfder tijd ook de hygrograafkastjes nog nat kunnen zijn.

Indien zich bij de meetniveaus scherpe inversies bevinden, kan het hoogteverschil van 8 meter met de temperatuurmeting een rol gaan spelen, hetgeen tot een te lage waarde van de absolute vochtigheid kan leiden.

De meeste besproken fouten werken niet systematisch, zodat alle door middeling verkregen eindresultaten vermoedelijk wel een betrouwbaarheid zullen hebben als overeenkomt met enkele procenten in de RV.

Gezien de uiteenlopende afwijkingen (2.4.2), die bij hygrograaf "62" optraden, kan het laatste niet gelden voor de 80m-resultaten. Zoals eerder vermeld, blijven die in het volgende dan ook buiten beschouwing.

### 3. De relatieve vochtigheid op 1½ m en 208 m hoogte

#### 3.1 Het dagelijks verloop

In tegenstelling tot de dampspanning  $e$ , die een conservatieve grootheid is bij isobare processen, vertoont de relatieve vochtigheid

$$RV = \frac{e}{e_s(T)}$$

een dagelijkse gang, omdat de temperatuur en dus de verzadigingsdampspanning  $e_s$  veranderen onder invloed van het dagelijkse verloop van de netto straling. Zoals bekend, gebeurt dit het sterkst nabij het aardoppervlak.

Men mag dus verwachten dat de RV een verloop vertoont, dat tegengesteld is aan dat van de temperatuur. Er zijn natuurlijk omstandigheden die dit geïdealiseerde beeld verstoren, zoals de passage van fronten e.d. Toch is in de seizoengemiddelden van figuur 1 nog veel van de ongestoorde dagelijkse gang terug te vinden. Het presenteren van een jaargemiddelde is weinig zinvol vanwege de dominante dagelijkse gang en vanwege het sterk variëren van de daglengte.

De tijden van maximum- en minimum RV vallen blijkbaar op beide hoogten in alle seizoenen rond 06 en 15 uur. Daarom is van deze uurvakken de frequentieverdeling van de opgetreden waarden in figuur 2 gepresenteerd. De verschillen met de hoogte zijn opvallend. Op 208 m bijvoorbeeld is in de herfst en de winter de dagelijkse gang al bijna verdwenen.

Opvallend is ook dat overdag de mediaan van de RV op 208 m hoger uitkomt dan die van 1½ m. In de zomer is het verschil zelfs ca. 3 %. Men kan dit vergelijken met de theoretisch te verwachten waarde voor de RV-gradiënt in een goed gemengde luchtlaag ( $z$  is de hoogte):

$$\frac{d \left( \frac{RV}{100} \right)}{dz} = \frac{dT}{dz} \frac{d}{dT} \left( \frac{e}{e_s} \right) = - \frac{g}{c_p} \frac{1}{e_s^2} \left( e_s \frac{de}{dT} - e \frac{de_s}{dT} \right)$$

Met de vergelijking voor de droogadiabaat en met Clausius-Clapeyron volgt:

$$\frac{d \left( \frac{RV}{100} \right)}{dz} = - \frac{g}{c_p} \frac{1}{e_s} \left( e_s \frac{c_p}{T} - e \frac{\epsilon L}{RT^2} \right) = - \frac{g}{RT} \left( 1 - \frac{\epsilon L}{c_p T} \right) \frac{RV}{100}$$

Bij  $T = 15^\circ$  is de uitkomst  $5 \cdot 10^{-4} \times \frac{RV}{100}$ . De RV-gradiënt over de laag tussen 208 m en 1½ m bedraagt dus ongeveer 0,1 x RV. Bij een vochtigheid aan de grond van 90 % volgt dan voor 208 m ongeveer 100 %. Is de vochtigheid aan de grond echter 27 %, dan is ze bij de top van de mast nog slechts tot ca. 30 % gestegen.

Bovenstaande redenering gaat op, zolang de gradiënten van temperatuur en dampspanning veel op het droogadiabatisch verloop lijken. Een ruwe schatting leert dat dit ook voor een onstabiele luchtlag in voldoende mate het geval is. Op grond hiervan zijn de uit figuur 2 af te lezen gemiddelde gradiënten in RV over de mast bij hoge RV overdag wat kleiner dan volgens de gegeven schatting. Misschien is dit verschil te begrijpen uit het geringe aantal waarnemingen; elke kromme uit figuur 2 berust op ca. 90 metingen. Voorts zal het op de bedoelde vochtige dagen nogal eens bewolkt of regenachtig zijn geweest. Daarbij plegen allerlei meetfouten op te treden. In de gegeven schatting is ook het eventueel optreden van lage wolken niet betrokken.

### 3.2 Optreden van zeer droge lucht

Vooraf bij de "nacht"-waarnemingen in figuur 2 is in alle seizoenen merkbaar dat lage vochtigheden op 208 m hoogte aanmerkelijk frequenter voorkomen dan bij de grond. Dit is begrijpelijk, omdat nachtelijke inversies vaak onder het 200m-niveau blijven. Dit betekent dat in zulke nachten op 200 m de temperatuur weinig of niet daalt en bij behoud van de dampspanning blijft dan ook de RV ongeveer gelijk.

In figuur 2 zien we dit effect in haast alle seizoenen: vooral bij lage vochtigheid, d.w.z. bij helder weer, komen de nachten dagkromme op 208 m hoogte dichter bij elkaar. Blijkbaar is dan ook de dagelijkse gang van de RV gering.

In zeldzame gevallen wordt boven een inversie zeer droge lucht aangevoerd. Dit kan normaal gesproken alleen gebeuren, indien een inversie dag en nacht in stand blijft in de onderste paar honderd meter van de atmosfeer. Dit pleegt bij voorkeur in het winterhalfjaar voor te komen. Vooral 's nachts kan de inversie dan tot lager dan 200 meter dalen. Indien boven de inversie grote droogte voorkomt, kan deze meestal door subsidentie (grootschalige dalende luchtbewegingen) worden verklaard. De aanwezigheid van de inversie verhindert daarbij aanvulling met waterdamp afkomstig van het aardoppervlak.

Door het beschreven mechanisme kan zeer lage RV op 208 m vaker voorkomen dan bij de grond. De thans beschikbare waarnemingen bevestigen dit beeld. Van eind 1972 tot en met 1975 daalde op 208 m hoogte de RV tijdens 5 etmalen tot onder 20 % en tijdens 3 etmalen zelfs tot onder 10 %: totaal in uren over 3 jaar resp. 36 en 10 uur. Op één uitzondering na betrof dit wintersituaties zoals boven geschetst en werd bij de grond geen extreem grote droogte geconstateerd. De uitzondering betrof de situatie van 11 juni 1975 met advectie van droge lucht uit het oostnoordoosten op alle niveaus onder ca. 700 meter.

De hier gegeven getallen kunnen slechts een indruk geven. De RV-meting is bij lage waarden weinig nauwkeurig en bovendien is voor het bepalen van de frequentie van voorkomen van zeldzame verschijnselen een lange meetreeks nodig.

### 3.3 Representativiteit van de relatieve vochtigheidsmetingen

Vooraf bij het bespreken van de koeltorenpluimen in paragraaf 5 wordt de vraag belangrijk of uit gegevens voor één jaar en één station conclusies voor langere termijn en voor heel Nederland getrokken mogen worden. Beantwoording van deze vraag kan misschien naderbij worden gebracht door te letten op de RV. Deze grootte wordt immers al lange tijd op vele stations geregistreerd, zij het uitsluitend op de normale waarnemingshoogte van 1½ m. Dit laatste is niet erg bezwaarlijk, omdat mag worden verwacht dat de 208m-resultaten zeker niet sterker door lokale verschillen in ondergrond zullen zijn beïnvloed.

In de eerste plaats kan worden geconstateerd dat 1973 geen duidelijk afwijkend jaar is geweest. Bij de meeste stations met lange reeksen week de jaargemiddelde RV over 1973 niet merkbaar van het klimatologische gemiddelde af.

Het jaargemiddelde van de RV te Cabauw over 1973 was 85 % en valt aan de hoge kant uit in de reeks van de andere stations (77-86 %). Het is niet te zeggen of dit als een bevestiging van de in 2.4.3 geopperde mogelijke systematische fout moet worden gezien, of dat de lucht te Cabauw wat vochtiger is dan op andere stations. Overigens was de RV op 208 m hoogte gemiddeld 76 %.

De vraag of de Cabauw-metingen werkelijk representatief zijn voor een groter gebied kan niet worden beantwoord, enerzijds door lokale effecten als boven vermeld, anderzijds vanwege de verdenking die tegen de meetnauwkeurigheid van een aantal van de stations kan worden ingebracht. Die verdenking ontstaat als nabijgelegen stations onbegrijpelijk grote verschillen in jaargemiddelden blijken te vertonen. Als voorbeeld: Zestienhoven 84 %, Naaldwijk 78 %, waarbij dit laatste station 4 % onder het veeljarig gemiddelde bleef. Een ander voorbeeld: Volkel 85 %, Gemert 81 %. De jaargemiddelden uit het KNMI-Jaarboek A voor 1973 blijken tamelijk chaotisch over het land verspreid. Het is daarom thans niet wel mogelijk wat betreft de RV verschillen over Nederland aan te tonen en evenmin kan de representativiteit van de Cabauw-metingen bevestigd of ontkend worden.

De dagelijkse gang van de RV op 1½ m hoogte te Cabauw kan met oudere gegevens van De Bilt worden vergeleken (Braak, 1938, p. 24). De verschillen zijn gering, met uitzondering misschien gedurende de wintermaanden, waarin de RV-metingen van Cabauw nogal hoog uitvallen. Zoals nog in 5.4 zal blijken, hangt dit samen met het frequent voorkomen van lage wolken in 1973.



#### 4. De absolute vochtigheid

##### 4.1 Dagelijkse en jaarlijkse gang

De absolute vochtigheid verdient speciale aandacht, omdat ze als een zg. conservatieve grootheid kan worden beschouwd, d.w.z. een grootheid, die bij bepaalde veel voorkomende atmosferische processen haar waarde behoudt. De dampdruk is bijvoorbeeld ongevoelig voor stralingsprocessen en de dagelijkse gang van de dampdruk weerspiegelt uitsluitend hoeveel ten gevolge van allerlei processen, zoals bijvoorbeeld verdamping, de werkelijke waterdampinhoud op de meetplaats kan veranderen.

De dampdruk verandert echter evenredig met de totale luchtdruk bij verticale verplaatsing van een luchthoeveelheid en daarom zijn metingen op 208 m en 1½ m beter te vergelijken door op de mengverhouding  $r$  te letten, uit de dampdruk af te leiden volgens

$$r = \frac{\epsilon e}{p-e}$$

De mengverhouding geeft het aantal kg waterdamp per kg droge lucht. Vaak wordt de mengverhouding in g/kg gepresenteerd. De constante  $\epsilon = 0.622$  in de teller is weer de verhouding van de moleculairgewichten van waterdamp en droge lucht.

Figuur 3 toont per seizoen de gemiddelde dagelijkse gang van de mengverhouding op beide meethoogten. Hoewel hierbij steeds is gemiddeld over ca. 90 dagen met allerlei uiteenlopende weersomstandigheden, variërend van mist tot onbewolkt weer, blijven toch bepaalde effecten duidelijk zichtbaar. De dubbeldaagse gang op 1½ m hoogte, vooral in het zomerseizoen, is welbekend en kan worden verklaard uit het achtereenvolgens overheersen van de processen dauwvorming, verdamping, convection met bovenwaartse dampafvoer, verdamping en opnieuw dauwvorming (zie Braak, 1938, p. 19 e.v.). Bij toename van de bewolking worden deze processen minder intensief, terwijl heldere dagen een nog veel duidelijker dagelijkse gang dan het gemiddelde van figuur 3 vertonen.

Op 208 m is de dubbeldaagse gang al bijna afwezig. De verschillen tussen 208 m en 1½ m weerspiegelen het vertikaal

vochttransport dat plaatsvindt, hoewel ook de (dagelijkse gang van de) weerstand van de beschouwde laag tegen transporten een grote rol speelt. De verticale verschillen in figuur 3 stemmen kwalitatief redelijk overeen met de dagelijkse en jaarlijkse gang van de verdamping.

Opgemerkt kan hier wel worden, dat het presenteren van gemiddelden soms weinig zichtbaar laat van afzonderlijke fysische processen. Zo is bijvoorbeeld te 06 uur de mengverhouding op  $1\frac{1}{2}$  m gemiddeld 0.3 g/kg hoger dan op 208 m. Voor de ca. 60 gevallen daarbij met mist onder 180 m blijkt de mengverhouding op  $1\frac{1}{2}$  m juist gemiddeld 0.5 g/kg lager dan op 208 m. Uiteraard houdt dit verband met het op  $1\frac{1}{2}$  m in de mist aanwezige gecondenseerde water. Zo is er een groot aantal effecten; opsplitsen van deze korte meetreeks is echter weinig zinvol door de introductie van steekproefeffecten.

#### 4.2 Representativiteit en nauwkeurigheid

Aannemende dat de temperatuurmetingen te Cabauw goed zijn, wordt de nauwkeurigheid van de meting der absolute vochtigheid geheel bepaald door de RV-meting. In 2.6 zijn temperatuurmeetfouten vermeld, die zowel tot over- als onderschatting van de absolute vochtigheid kunnen leiden.

Om dezelfde reden als in 3.3 valt over de representativiteit van de meting der absolute vochtigheid geen uitsluitel te geven. In figuur 5 is de dagelijkse gang op  $1\frac{1}{2}$  m met De Bilt vergeleken. Bij een goede overeenstemming van het verloop is Cabauw steeds ca. 0.3 g/kg hoger en dit verschil werd vooral in de lente en de zomer opgebouwd. Gezien de resultaten van 3.3 is het begrijpelijk dat ook het jaargemiddelde van de mengverhouding te Cabauw aan de hoge kant ligt, nl. 6.5 g/kg tegen 5.8-6.6 g/kg op de andere stations in Nederland.

Voor de meting op 208 m hoogte is geen Nederlands vergelijkingsmateriaal aanwezig. Onlangs zijn resultaten van een mast bij Karlsruhe (BRD) gepubliceerd door Dilger c.s. (1975). Deze metingen betroffen een enigszins afwijkende periode, ca. 11

maanden later dan de KNMI-metingen. Figuur 4 laat goede overeenstemming zien wat betreft het verloop op zowel 2 (1½) als 200 m. De gemiddelden te Cabauw zijn echter hoger: bij de grond 0.4 g/kg en boven zelfs 0.5 g/kg. Gezien afstand en tijdsverschuiving valt uit de genoemde verschillen niets te concluderen.

## 5. Schattingen van pluimlengten van een fictieve 500 MW-koeltoren

### 5.1 Wijze van schatten

Hiervoor is de methode gevolgd, die beschreven is door Wessels en Wisse (1970, 1971, 1972). Aan de eerste en laatste publikatie wordt verder gerefereerd met W.R. 70-5 resp. W.R. 72-3.

Met uurgemiddelden van temperatuur T (°C) en relatieve vochtigheid (%) op ca. 200 m hoogte wordt het enthalpie-exces berekend zoals dat optreedt aan de rand van een door mengingscondensatie gevormde pluim:

$$\text{enthalpie-exces pluimgrens} = 0,245 \cdot e^{\frac{T}{12.3}} \cdot (100-RV) \text{ kJ/m}^3$$

(zie W.R. 70-5).

Hierbij is verondersteld dat de enthalpie van lucht bij het verlaten van de koeltoren 55 kJ/m<sup>3</sup> meer bedraagt dan die van de buitenlucht.

Tenslotte wordt voor een koeltoren met een bovendoorsnede van ca. 60 meter en een warmteafvoer van 500 MW berekend op welke afstand van de toren het bovengenoemd enthalpie-exces nog aanwezig is. Daarbij wordt rekening gehouden met de windsnelheid, die de initiële verdunning bepaalt en met de mate van horizontale en verticale verspreiding van bijmengselen in de atmosfeer. Voor het laatste is de zg. Pasquill-stabiliteitsklasse (KNMI, 1974) maatgevend, een indeling van de mogelijke atmosferische omstandigheden in afhankelijkheid van de geschatte statische stabiliteit. Deze Pasquill-klasse kan worden bepaald uit een windsnelheidsmeting en een visuele bewolkingsschatting. In verband met het ontbreken van visuele waarnemingen te Cabauw is bij dit onderzoek gebruik gemaakt van gegevens van Schiphol voor het schatten van de stabiliteitsklasse. Bij de keuze van Schiphol is gelet op zo goed mogelijke overeenstemming in windsnelheid.

Koeltorenpluimen vallen vaak niet of nauwelijks op bij aanwezigheid van mist of lage wolken. Bij de eerdergenoemde studies kon hierop niet worden gelet. De Cabauw-mast bevat zichtmeters op verschillende niveaus tot ca. 180 m hoogte. Een schatting van het al dan niet zichtbaar zijn van de berekende pluim werd als volgt verkregen:

De pluimberekening heeft betrekking op gemiddelden over een uur. Is er nu, zowel in de eerste als in de tweede helft van dit uurvak, een zichtverslechtering tot minder dan 500 m geregistreerd ten gevolge van lage wolken beneden 180 m of ten gevolge van mist tot op minstens 60 m hoogte, dan werd de pluim geacht onzichtbaar te zijn. Bij de gevolgde registratiemethode werden de zichtmetingen per hoogte slechts ca. 40 maal per uur op een recorder vastgelegd, zodat het gekozen criterium inderdaad een flinke bedekkingsgraad met lage wolken dan wel een goed ontwikkelde mist betekent.

Na toepassing van deze procedure bleken alle uurgemiddelden met  $RV = 100\%$  te zijn afgevallen. Dit is wenselijk, omdat anders toepassing van bovenstaande formule tot moeilijkheden leidt. Ook vele gevallen met  $RV = 99\%$ , waarbij onnauwkeurige schattingen van lange pluimen resulteren, konden zo worden vermeden.

## 5.2 Statistiek van pluimlengten van "zichtbare" pluimen

De resultaten worden grotendeels in de vorm van grafieken gepresenteerd. Figuur 6 geeft de dagelijkse gang. Duidelijk blijkt dat lange pluimen vooral bij de nacht en vroege ochtend horen en in veel mindere mate in de namiddag optreden. De dagelijkse gang is in de winter wat geringer en de pluimlengte wat groter. Een aantal uurvakken is tezamen genomen om een gemiddelde overschrijdingskans voor "dag" en "nacht" te krijgen en daarvoor zijn in figuur 7 cumulatieve frequentieverdelingen gegeven. Figuur 8 tenslotte, geeft het jaargemiddelde van de pluimlengte-verdeling respectievelijk 's nachts en overdag.

### 5.3 Invloed van de windrichting

De windrichting bepaalt in welke sector ten opzichte van de koeltoren de pluim visueel het meest zal opvallen. Figuur 9 geeft de verdeling van de windrichting op 200 m voor die gevallen waarbij pluimen langer dan 100 m zijn berekend (alle uren). In slechts 1 % van de gevallen kon geen windrichting worden gemeten of was de richting te variabel.

Volgens figuur 10 is het richtingseffect weinig afhankelijk van de pluimlengte, zodat uit figuur 9 mag worden geconcludeerd dat de pluimen met een lichte voorkeur naar het noordoosten gericht zullen zijn.

Behalve naar de visuele aanblik van de pluim kan men ook vragen naar de mogelijke onderschepping van zonnestraling. Dicht bij de toren is er wel enige schaduwwerking van toren en pluim. Berekeningen worden gecompliceerd door aantal en configuratie van de torens, zonnestand, bewolking e.d. Een eerste ruwe schatting leert dat op ca. 500 m afstand van de toren de kans om in de pluimschaduw te komen al tot beneden 0.1 % is gedaald. Bij een dergelijke lage frequentie lijkt het overbodig nog onderscheid naar windrichting te maken.

Behalve de verdeling van pluimrichtingen in figuur 9 is ook de kans van belang dat bij gegeven windrichting een bepaalde pluimlengte wordt overschreden. Zie figuur 12 b. Vermenigvuldiging met de kansverdeling van alle voorgekomen windrichtingen (figuur 13) moet dan weer figuur 9 opleveren. Hoeveel procent van de gevallen met bepaalde windrichting bij voorbaat al afvalt voor de pluimenstatistiek vanwege het zichtbaarheids criterium kan ongeveer worden afgeleid uit figuur 12 a.

Zoals bekend en zoals blijkt uit figuur 13, overheersen in ons land zuidwestelijke winden. De kans op lage wolken bij zuidwestelijke wind bleek dit jaar vrij groot. Zelfs na aftrek van deze gevallen, die misschien dit jaar wat te veel vertegenwoordigd waren (5.4), was bij deze windrichting de kans op lange pluimen nog aanzienlijk.

Ook bij noordelijke winden blijkt een zekere voorkeur voor lage wolken en lange pluimen.

#### 5.4 Representativiteit van plaats en meetjaar

Wat betreft het eerste kan naar de hoofdstukken 3 en 4 worden verwezen. Met de beschikbare metingen kunnen eventuele kleine horizontale verschillen in de RV niet worden aangetoond en gegeven de geringe gradiënten in de andere betrokken groot-heden geldt dit ook voor berekende pluimen. De hier geboden resultaten zullen dus geen grote verschillen vertonen met die van andere locaties in Nederland, met enig voorbehoud misschien voor de kuststrook en de heuvels van Zuid-Limburg.

Het jaar 1973 toonde wat betreft vochtigheid en temperatuur geen grote afwijking van het klimatologisch gemiddelde. De winter was iets te zacht en de herfst en de lente waren aan de koude kant. De windrichting-statistiek voor De Bilt had een maximum, dat ca.  $30^{\circ}$  geruimd was ten opzichte van het gemiddelde (1931-1960) zuidwestelijke maximum. Gedurende de lente kwam noordelijke wind vaker voor dan normaal en gedurende de zomer oostelijke wind.

Van meer betekenis voor het beoordelen van deze reeks pluim-berekeningen is het optreden van mist en lage wolken. Figuur 11 geeft de kans op zichtverslechtering op verschillende niveaus te zien. Men kan de krommen ontstaan denken door opstellen van twee effecten: condensatie ten gevolge van afkoeling nabij de grond (mist) en condensatie bij vertikaal transport (stratus-bewolking). Thans is pas ruim twee jaar registratie bewerkt maar de indruk bestaat toch wel dat de hoge frequentie voor de wintermaanden van 1973 een uitschieter was. Het volgende jaar had een ca. driemaal geringer percentage. Indien wat dit betreft de situatie in 1973 uitzonderlijk was, dan zijn vermoedelijk de cijfers voor de winter in de figuren 6 en 7 te laag, maar op het resultaat van het gehele jaar (figuur 8) zal dit niet al te veel invloed hebben.

#### 5.5 Vergelijking met een eerdere KNMI-publikatie

Een vrij volledige schatting met behulp van radiosondewaarnemingen voor 1969 is te vinden in W.R. 72-3. Vooral bij de nachtwaarnemingen komen de daar genoemde percentages aanmerkelijk hoger dan die van figuur 7. De geschatte overschrijdingskans voor pluimen

van 100 m in het winterhalfjaar is in W.R. 72-3 te 00 uur ca. 60 % en te 12 uur ca. 43 %. Hier wordt dit ca. 18 resp. 16 %.

Vergelijken met schattingen in een ander jaar is moeilijk, vooral als men denkt aan de slotopmerking van de vorige paragraaf. Toch zijn om verschillende redenen de nieuwe schattingen beter:

- Radiosonde- en hoogtewindwaarnemingen zijn minder nauwkeurig.
- Het toepassen van een zichtbaarheids criterium leidt tot een antwoord, dat past bij de oorspronkelijke vraagstelling naar visuele hinder. Voorts worden zo juist de te lang geschatte pluimen (gevallen met hoge RV) uit het materiaal verwijderd.
- Bij de keuze van Pasquill-klassen voor de bewerking van W.R. 72-3 werd de windsnelheid van De Bilt gebruikt. De anemometer is daar echter te beschut opgesteld. Overdag treedt dan gemiddeld overschatting en 's nachts onderschatting van pluimlengten op.

Vooraf het punt van de zichtbaarheid verklaart veel van de discrepantie. Had deze selectie niet plaatsgevonden, dan waren de bovengenoemde percentages niet 18 en 16, maar ongeveer 35 en 36 geweest.

Tenslotte kan nog worden opgemerkt, dat een windrichtingsvoorkeur (5.3) in het materiaal van W.R. 72-3 niet kon worden aangetoond.

## 5.6 Vergelijking met waarnemingen

Buiten Nederland staan vele koeltorens, maar er zijn weinig systematische pluimmetingen verricht. In onderstaande tabel zijn twee uitzonderingen samengevat: bewerkingen van dagelijks gemaakte foto's. Het vaststellen van de visuele indruk stond voorop, zodat slechts overdag is waargenomen.

Tabel

referentie	Bierman c.s. (1971)	Barber et al. (1974)
periode	okt.'70 t/m sept.'71	febr.'69 t/m juli '69
centrale	Keystone (USA)	Ratcliffe-on Soar (UK)
in torens afgevoerde warmte	ca. 2000 MW	ca. 1000 MW
aantal torens	8	3
percentage lange pluimen	26 % > 900 m	10.3 % > 530 m
opmerkingen	inclusief de bij mist of wolken nog herken- bare	daarenboven 16.5 % overgaand in bewolking

Beide rapporten komen in de orde van 26 % uit voor "herkenbare" lange pluimen. Vergelijken met figuur 8 levert bij 600 m pluimlengte overdag een overschrijdingskans van ca. 7 %. Het verschil is niet gering, maar de vergelijking is eigenlijk onjuist vanwege: de andere plaats, de andere periode, het berekenen voor slechts één toren en vooral het andere criterium voor zichtbaarheid.

5.7 Discussie van de resultaten

Bij de toepassing van een schattingmethode als hier geschetst, ontstaan fouten die inherent zijn aan beperkingen van het model en ook fouten ten gevolge van onnauwkeurige invoergegevens. Slechts van de laatste soort fouten is een kwantitatieve schatting mogelijk.

In vorige paragrafen, zoals bijvoorbeeld 2.6, is al wat gezegd over de meetfouten. Om een indruk te geven van de gevoeligheid voor fouten in de diverse invoergegevens kan worden opgemerkt, dat in een gemiddeld geval ( $T = 5^{\circ} \text{C}$ ,  $RV = 93 \%$ ,  $u = 4 \text{ m/s}$ , Pasquill-klasse D) een fout van 10 % in de resulterende pluimlengte van 600 m kan worden veroorzaakt door een fout van  $2^{\circ} \text{C}$  in  $T$ , ruim 1 % in  $RV$  en  $0.6 \text{ m/s}$  in de windsnelheid  $u$ . Daar het hier om een pluimenstatistiek gaat, moet op systematische fouten worden gelet. Dan blijkt vooral de  $RV$  een belangrijke foutenbron. Gezien het voorgaande lijken systematische fouten van meer dan 1 % in de  $RV$  niet geheel uitgesloten. Overigens is ook hier  $(100-RV)$  eigenlijk de relevante grootte (vgl. 5.1). Een andere keuze van



Pasquill-klasse heeft ook grote invloed op de pluimschatting, maar dit aspect is eigenlijk met het model verbonden.

Essentiële bezwaren van het model zijn reeds in de voorgaande publikaties opgesomd (bijv. W.R. 70-5). Toepassing van het Pasquill-model kan bijvoorbeeld worden aangevochten. De voornaamste beperking is wel, dat steeds menging met ongestoorde lucht op 200 m hoogte is ondersteld. In werkelijkheid zal de pluim vanaf de rand van de koeltoren op 100 à 150 m geleidelijk stijgen en eventueel hoogten van vele honderden meters bereiken. Boven het niveau van onze metingen kan de pluim een inversie ontmoeten en die al dan niet doorbreken. Bij een atmosfeer met een neutrale opbouw, zoals overdag gebruikelijk, komt de pluim bij het stijgen in koudere lucht met hogere RV. Het oplossen van de pluim bij toenemende afstand van de toren wordt dan door het stijgen tegengewerkt en op het wolkencondensatie-niveau zelfs tot staan gebracht. Het is mogelijk dat in het verlengde van reeds opgeloste pluimen de vorming van cumulus- of stratocumulus-wolken wordt bevorderd.

Een meer geavanceerd model (zie bijv. Brog, 1975) zal dan ook met het verticale profiel van de gebruikte grootheden rekening houden. Voor toepassing is dan wel een klimatologie van gecombineerd optreden van die grootheden tot op vele honderden meters hoogte nodig!

## 6. Samenvatting en conclusie

Met zorgvuldige hygrograafmetingen gedurende een jaar is een indruk verkregen van het gedrag van enige vochtigheidsparameters tot ca. 200 m hoogte. Het blijkt mogelijk een kwalitatieve verklaring van de waarnemingen te geven. Betere resultaten zijn alleen met andere instrumentatie te verwachten.

De thans gepresenteerde pluimschattingen berusten op betere metingen dan die uit W.R. 72-3. Interessant is ook dat een goede indruk van de verdeling van pluimrichtingen en van de dagelijkse gang van de pluimlengte kon worden gegeven. Vooral van belang is, dat het al dan niet opvallen tussen andere wolken in de resultaten is verwerkt, voor zover de wolkenbasis lager dan 180 m kwam. Dit laatste is een tamelijk streng criterium, omdat de torens meestal lager dan 180 m zijn.

Duidelijk zichtbare pluimen langer dan 300 m komen overdag gedurende ongeveer 10 % van de tijd voor, maar daarenboven zal het vaak gebeuren dat lange pluimen tussen de lage bewolking herkenbaar blijven. Voor méér en/of grotere torens zullen langere pluimen te verwachten zijn.

Tenminste wat betreft de jaargemiddelden lijken deze pluimschattingen representatief voor het Nederlandse klimaat. Gegeven de mogelijke fouten in methode en invoergegevens is het trouwens niet zinvol een regionaal onderscheid te maken.

Verbetering van dit soort schattingen moet vooral worden verwacht van een beter model. Omdat invoergegevens voor klimatologische toepassing ook van boven 200 m betrokken moeten worden, lijkt zo'n ontwikkeling voorlopig uitgesloten. Indien een nauwkeurige pluimenstatistiek gewenst is, zal het waarschijnlijk meer praktisch en doelgericht zijn die met fotografische waarnemingen te verkrijgen.

## 7. Dankbetuiging

Medewerkers van de Sectie II van de Afdeling Meteorologisch Onderzoek verleenden assistentie bij dit onderzoek. Van hen wil ik vooral de heer J.G. van der Vliet bedanken voor zijn zorg bij de uitvoering van de metingen alsmede de heer J. Muijsert voor het verrichte rekenwerk.

Literatuur

- F. Barber, A. Martin,  
J. Shepherd, G. Spurr 1974 The persistence of plumes from natural draught cooling towers. Atm. Environment 8, p. 407-418.
- G. Bierman, G. Kunder,  
J. Siebald, R. Visbisky 1971 Characteristics, classification and incidence of plumes from large natural draft cooling towers. Combustion 43, p. 25-31.
- C. Braak 1938 Het klimaat van Nederland. G. Vochtigheid. K.N.M.I. Med. en Verh. 41.
- P. Brog 1975 "Model Sauna S" in: "Untersuchungen an einem Naturzug-Nasskühlturm". Fortschritt-Berichte der V.D.I. Zeitschriften 15, Nr. 5, p. 56-59.
- H.C. Byers 1974 General Meteorology, 4th ed. Mc Graw-hill, p. 406.
- F.K. Davey 1965 Hair Humidity Elements. Humidity and Moisture (Ed. A. Wexler) Vol. I, p. 571.
- H. Dilger, K. Nester,  
S. Vogt 1975 Statistische Auswertungen des Wind-, Temperatur- und Feuchteprofils sowie der Strahlung und der Windrichtungsfluktuation am Kernforschungszentrum Karlsruhe, K.F.K.-2164.
- M.J. Hickmann 1970 Measurement of humidity. N.P.L. notes on Applied Science. No. 4, London, H.M.S.O. 4th ed.
- K.N.M.I. 1974 Luchtverontreiniging en weer. Staatsuitgeverij 's-Gravenhage.
- H.G. Müller 1965 Humidity sensors from natural materials. Humidity and Moisture (Ed. A. Wexler) Vol. I, p. 574.
- H.R.A. Wessels,  
J.A. Wisse 1970, 1972 De pluim van een grote koeltoren, I en II. K.N.M.I. W.R. 70-5 resp. W.R. 72-3.
- H.R.A. Wessels,  
J.A. Wisse 1971 A method for calculating the size of cooling tower plumes. Atm. Environment 5, p. 743-750.

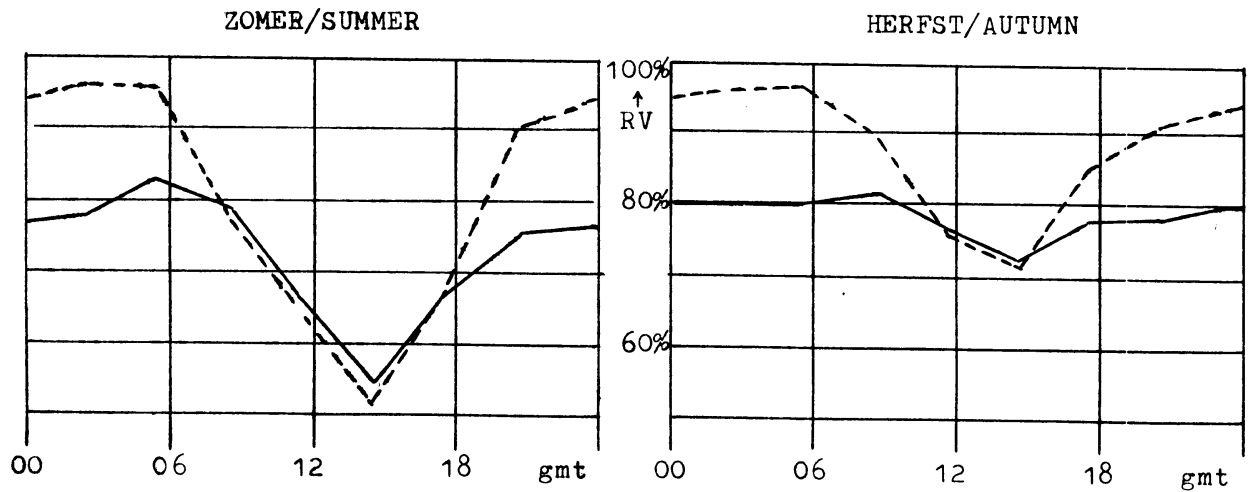
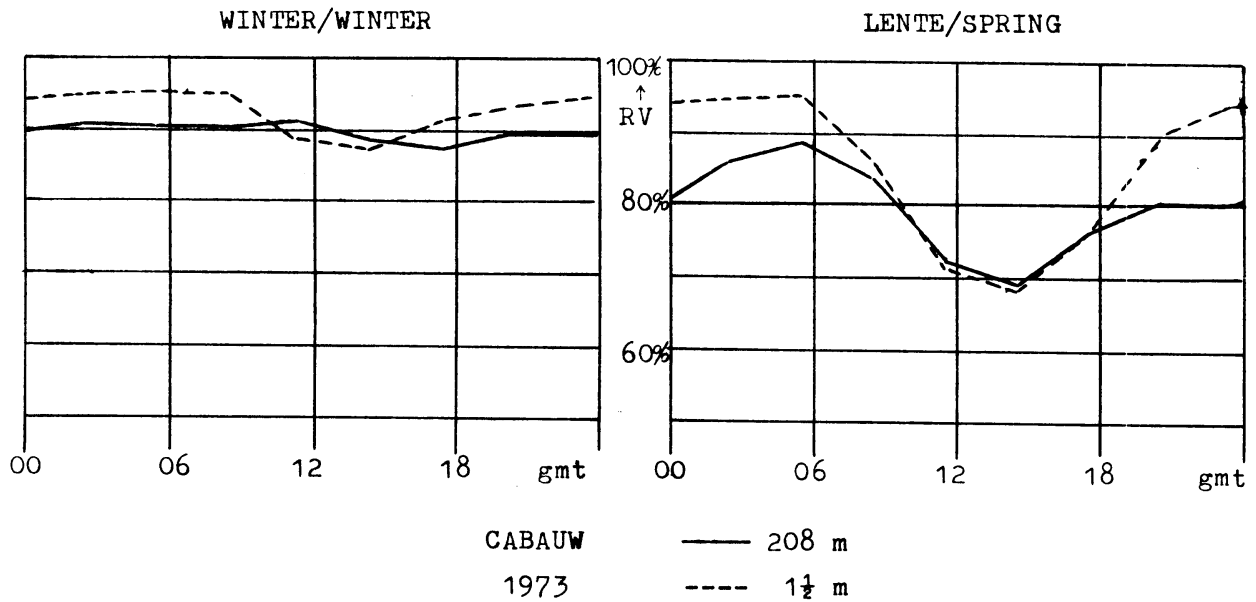


Fig. 1 Dagelijkse gang in 1973 per seizoen van de mediaanwaarde van de relatieve vochtigheid op twee hoogten. De winter omvat de maanden december (1973), januari, februari. De andere seizoenen volgen analoog.

Fig. 1 Diurnal variation during each season of 1973 of the median value of the relative humidity RV at two heights. In figures 1 through 6 winter is taken to include the months December 1973, January and February; etc.

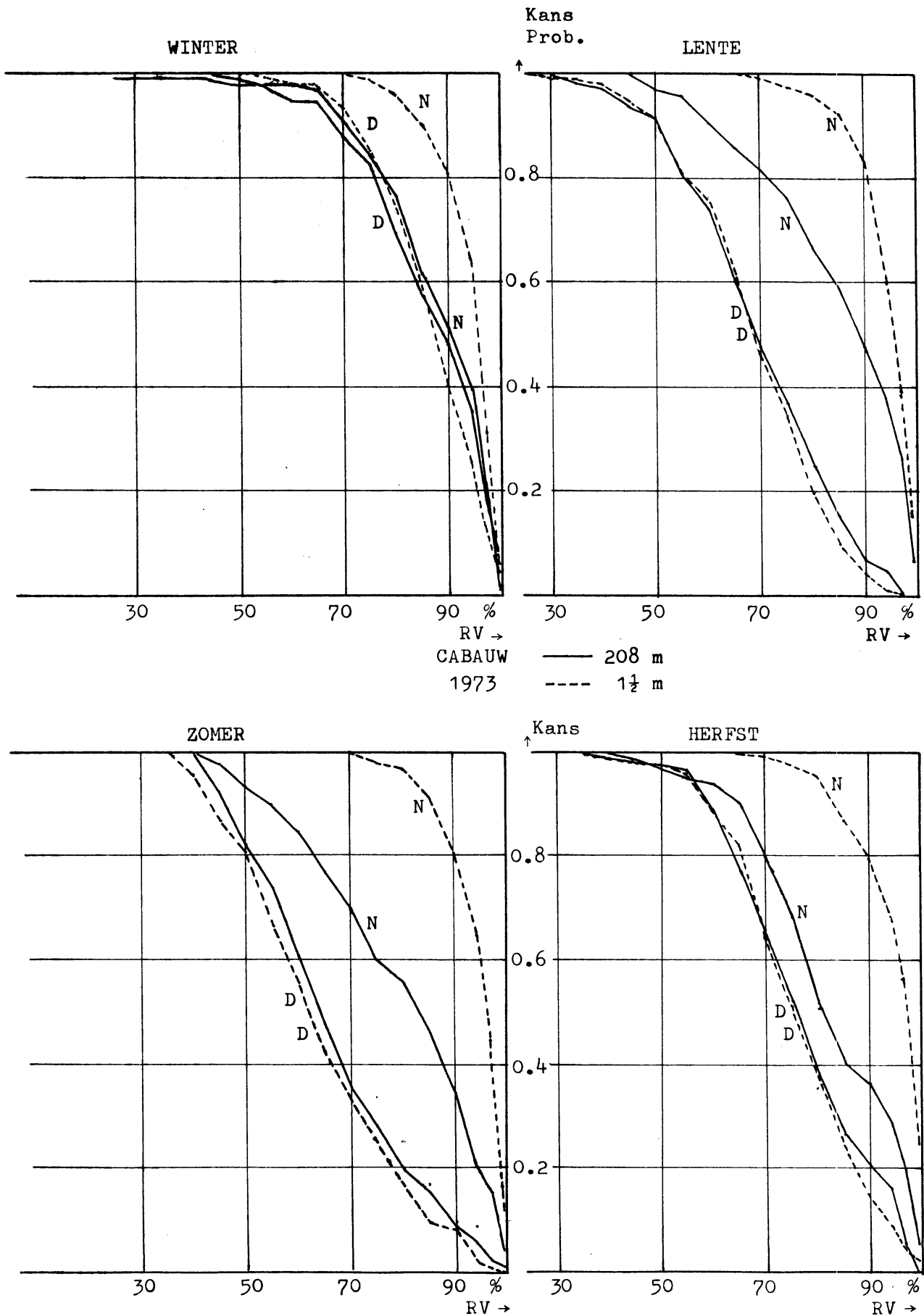


Fig. 2 Cumulatieve overschrijdingskans van de aangegeven waarden der relatieve vochtigheid voor de uurvakken voorafgaande aan 06 gmt (N) en 15 gmt (D), beide op twee hoogten.

Fig. 2 Probability of the relative humidity RV exceeding the value along the abscissa for the hours preceding 06 gmt (N) and 15 gmt (D).

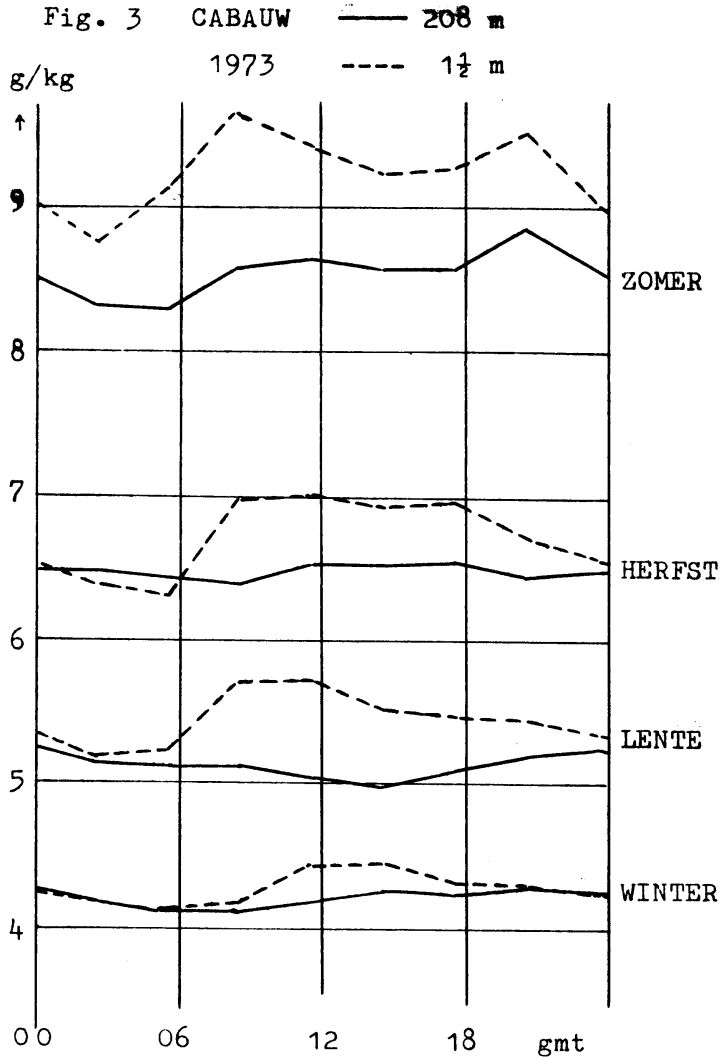


Fig. 3, 4, 5  
Gemiddelde dagelijkse gang van de mengverhouding.

Fig. 3, 4, 5  
Average diurnal variation of the mixing ratio.

Fig. 4  
C: CABA UW, 1973  
K: KARLSRUHE, dec.'73 t/m nov.'74

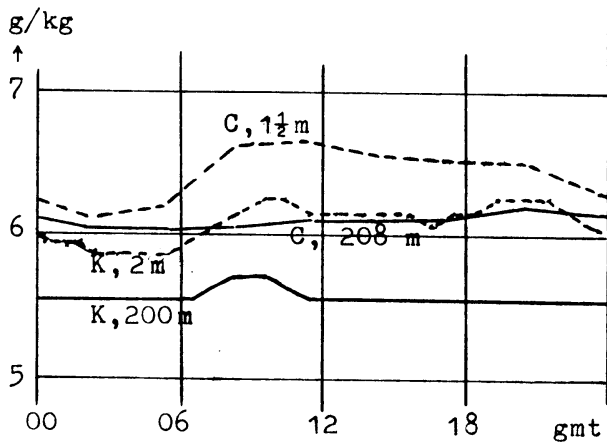


Fig. 5 1973, 1½ m

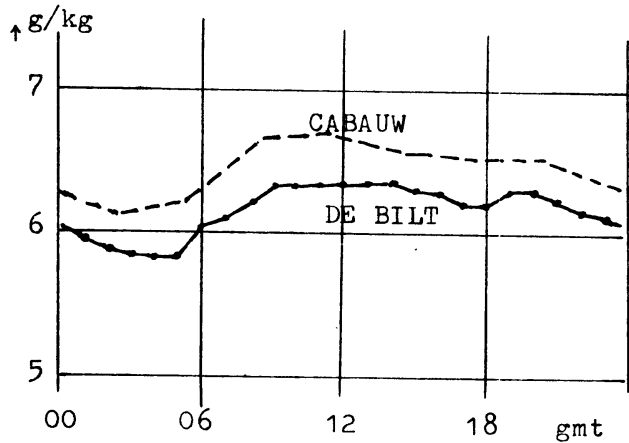
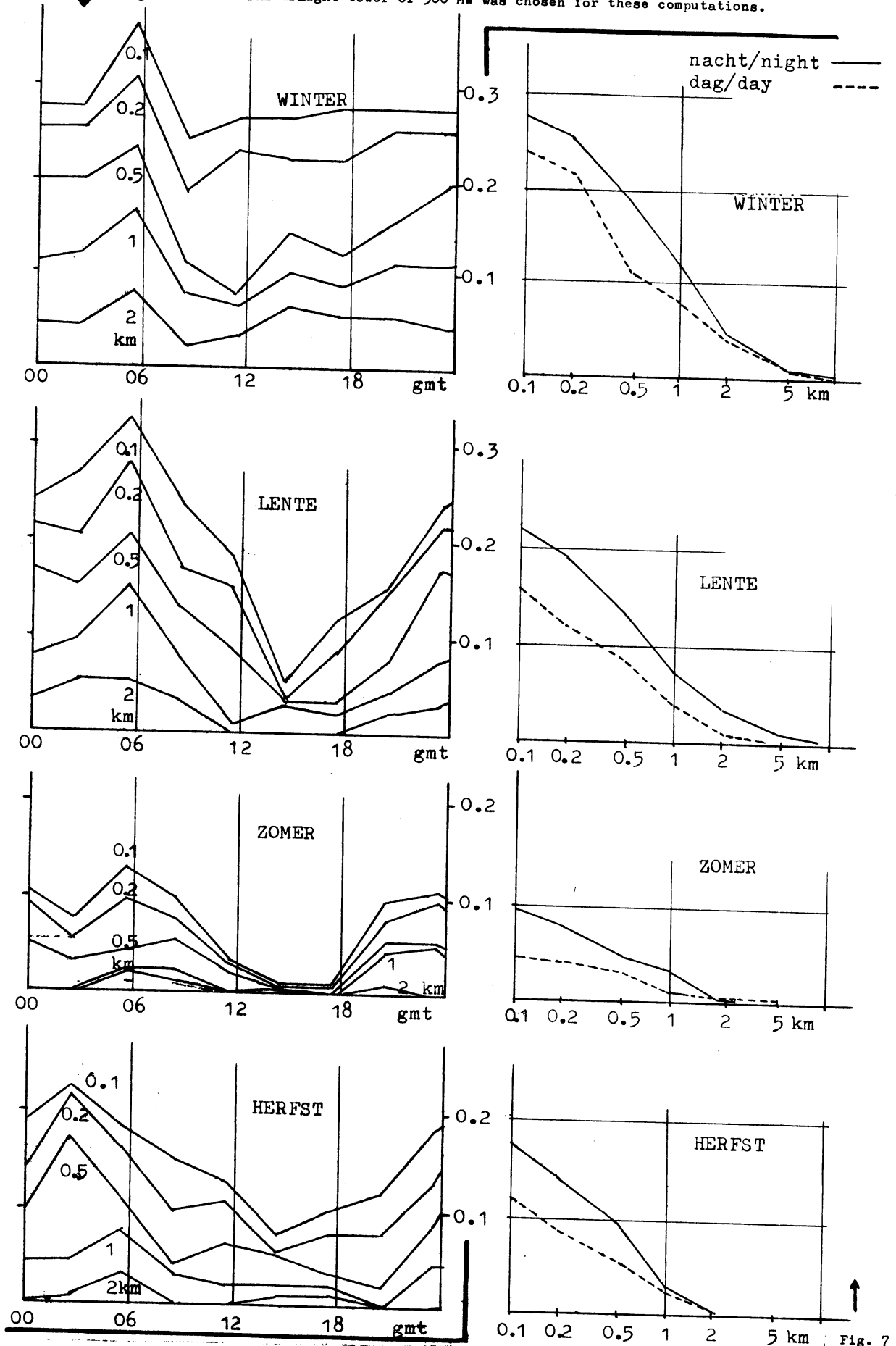


Fig. 6 Dagelijkse gang van kans op zichtbare (zie tekst) pluim van aangegeven geschatte lengte voor een 500 MW-koeltoren.

Fig. 6 Diurnal variation of the chance that plumes longer than certain lengths can be sighted. A natural draught tower of 500 MW was chosen for these computations.



Cumulatieve overschrijdingskans van gegeven pluimlengte-schattingen voor nacht (gem. 21, 24 en 03 uur) en dag (gem. 09, 12 en 15 uur).

Probability of the visible length of the plume to exceed the abscissa values. The average of the observations of 21, 24 and 03 hrs and 09, 12 and 15 hrs were taken as "night" and "day" resp.

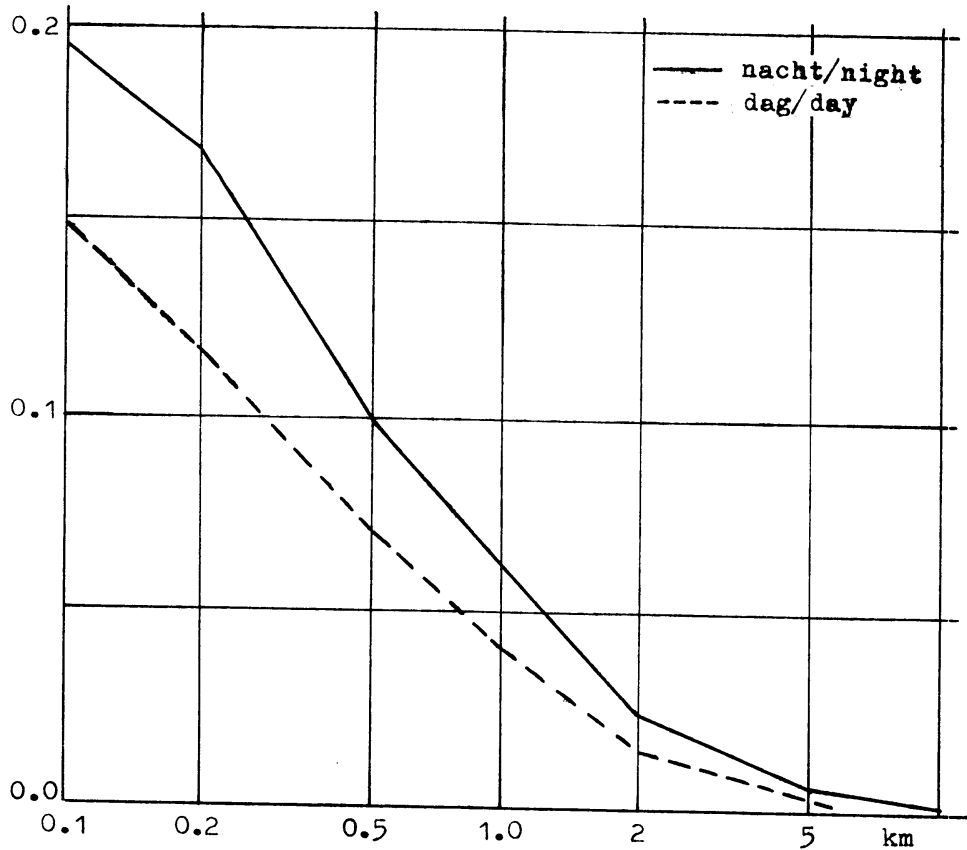


Fig. 8 Als fig. 7, voor het gehele jaar 1973.

Fig. 8 Like fig. 7, for all the 1973 observations.

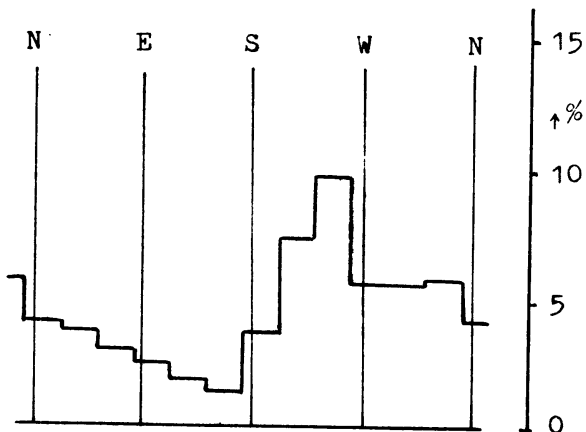
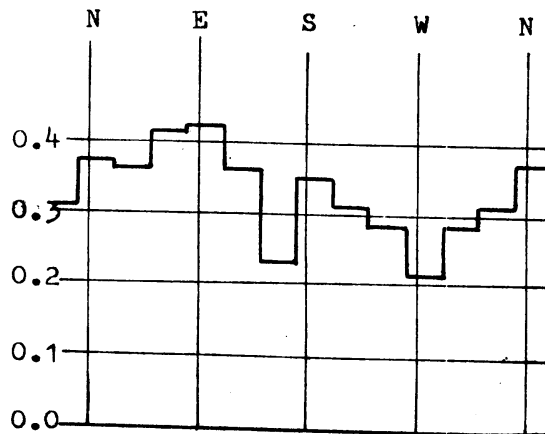


Fig. 9 Verdeling van de windrichting op 200 m per 30° sector voor de gevallen dat een zichtbare pluim van minstens 100 m lengte berekend is. Klasse Variabel: 1 %.

Fig. 9 Percentage frequency of occurrence of a certain wind direction (30° sectors) at Cabauw at the 200 m level for all cases that plumes of 100 m or more can be sighted.

Fig. 10 Fractie van het totale aantal pluimen (langer dan 100 m) dat langer dan 1000 m is. Verdeeld naar windrichting. Klasse Variabel: 44 %.

Fig. 10 Fraction of all the plumes (at least 100 m long) that exceed a length of 1000 m. Separately computed for 200 m wind direction-sectors.





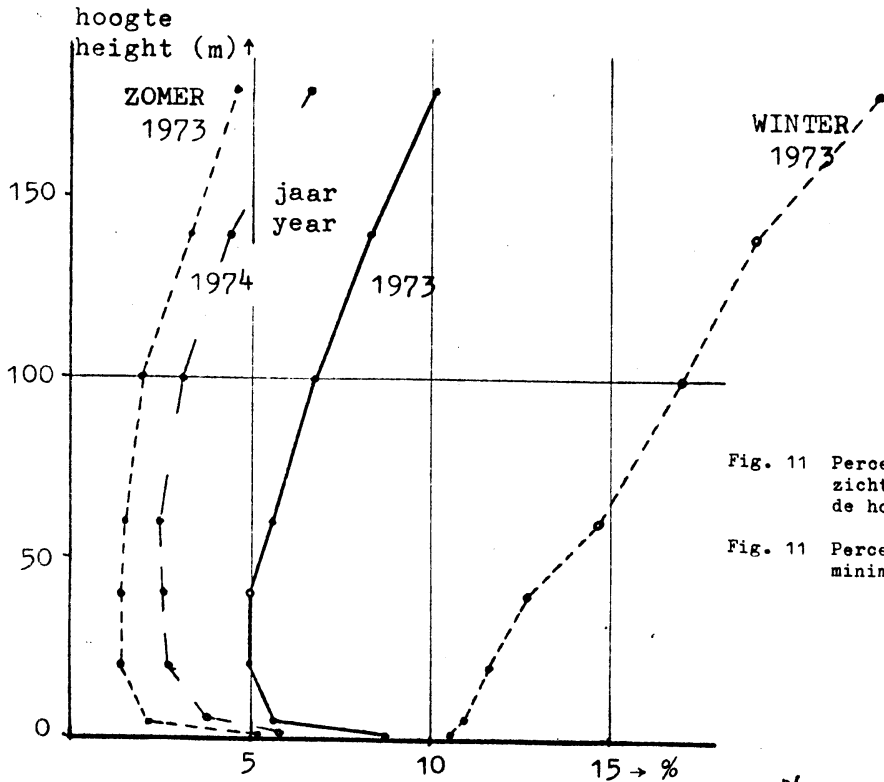


Fig. 11 Percentage halfuurvakken met minimum zicht minder dan 500 m, als functie van de hoogte, per seizoen en per jaar.

Fig. 11 Percentage of half-hour intervals with minimum visibility less than 500 m.

Fig. 12a en 12b

Kans op mist, lage wolken resp. zichtbare pluimen van 100 m of langer, beide bij gegeven windrichting. (VAR = windrichting variabel).

Fig. 12a and 12b.

Probability of some phenomena dependent on wind direction at 200 m. (VAR = wind direction variable).

Fig. 13 Kans op optreden per 10° sector van de gegeven windrichtingen (Cabauw 200 m, 1973).

Fig. 13 Percentage frequency of occurrence of 10° wind direction sectors.

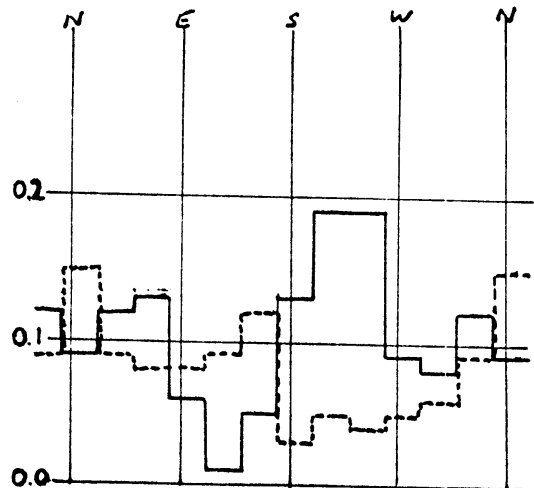


Fig. 12a ---- low fog (VAR. 5 %).  
— fog or stratus at 180 m (VAR. 28 %).

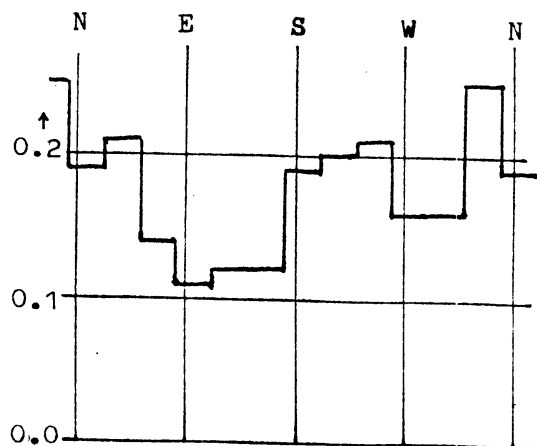
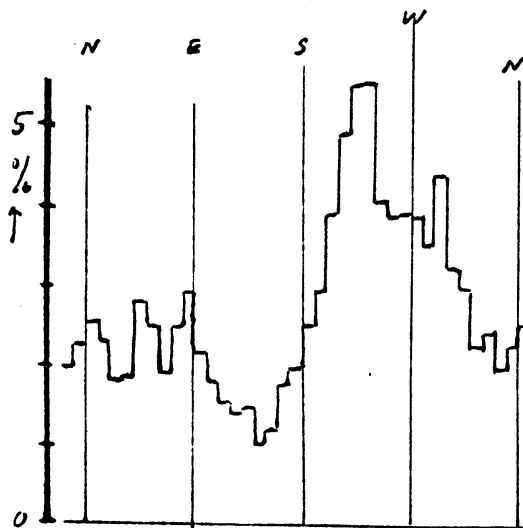


Fig. 12b — visible plume (VAR. 43 %)