

KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT

De Bilt

WETENSCHAPPELIJK RAPPORT

W.R. 72-3

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

De pluim van een grote koeltoren

II

De Bilt, 1971

Publikationsnummer: K.N.M.I. W.R. 72-3 (II)

U.D.C.: 551.551

Summary

This rapport deals with the plume of a wet cooling tower. Its length and the possibility that a plume causes fog and/or precipitation are discussed. The calculations are based on a model described in ref. (1). In ref. (2) a nomogram is given, to estimate the length of the plume of a cooling tower. It is assumed that the enthalpy of air passing through the tower is increased by 45 kJ/Kg and that the tower has an upper diameter of 60 m. In this report the nomogram (fig. 5) has been applied to data from radiosoundings at De Bilt, The Netherlands, at 00 and 12 CET (Central European Time) and at Goch, Federal Republic of Germany, 06 CET.

Fig. 1 gives the cumulative frequency distribution of the obtained plume lengths for a 500 MW cooling tower for the summer and the winter half year.

Fig. 2 and 3 give the number of plume lengths greater than 300, 1000 and 3000 m for 12 wind direction intervals, for respectively the winter and the summer half year. From these figures we conclude that no significant preference exists for long plumes to occur in certain directions.

Section 3 gives a discussion on various assumptions made by using the nomogram. The most essential problem is caused by the large temperature excess in the plume. Fig. 4 is an example of a temperature distribution in a plume, based on the model used in ref. (2). In contrast to a "normal" chimney plume for which the Pasquill dispersion model was developed, a significant temperature rise may exist at distances exceeding a few kilometers. Under these conditions the plume itself will determine to a certain extent its own dispersion, because of the thermally stable lower part and the unstable upper part of the plume. Moreover, the temperature distribution is favourable for bifurcation. As a result e.g. the differences between the plume lengths during the day and night in figure 1 may be overestimated. It appears that especially the daytime plume lengths in summer are underestimated.

In section 4 a discussion is given on the question whether or not visible parts of the plume can be carried down to ground level. In ref. (2) it is demonstrated that according to the model used, the possibility of nuisance at the ground diminishes sharply with increasing height of the cooling tower. Hardly any fog is expected at ground level if the effective height is in excess of 150 meters. However, in ref. (2) the steady rise of the large warm plume and the increased stability in its lower parts, are not taken into account. Therefore, it is likely that even towers of perhaps 100 meters high will not cause fog at ground level. It should be stressed that this fogging remains a serious problem with low mechanical draft towers.

A different mechanism capable of bringing down plume elements during strong winds is downwash in the lee of the cooling tower. It appears from the results of ref. (3), that parts of the plume can reach the ground at distances of about 2 or 4 times the tower height, if the windspeed exceeds 7 m/sec, supposing a Froude number of 0.75 for the interaction of the cooling tower-outflow with the environment. It depends on the local climate whether at high windspeeds the visible part of the plume will be long enough to reach the ground. In the climate of the Netherlands, this will be a rare phenomenon. In this report, local effects like katabatic winds are not considered.

The theoretical possibility is mentioned that at temperatures below -5°C artificial freezing nuclei might cause a Bergeron-type of snow formation in the plume. A few cases of artificially induced snowfall during natural fog were reported to the authors during the last years. In reference (4) a similar case is described. As a result of this phenomenon snowfall could occur at some distance from the tower.

It is assumed, in this report, that drizzle from cooling towers will not occur if appropriate precautions against carry-over of droplets have been taken by installing eliminators.

De pluim van een grote koeltoren II

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

1. Inleiding

In verband met de verwachte toename van het elektriciteitsverbruik in Nederland is de koelwatervoorziening onderwerp van studie. Hierbij is de vraag gerezen in hoeverre zogenaamde natte koeltorens kunnen worden toegepast. Tegen het gebruik van natte koeltorens worden vaak bezwaren ingebracht in verband met mist- en ijzelvorming. In overleg met de N.V. KEMA heeft het K.N.M.I. de vraag in studie genomen hoe groot de pluim van een grote natte koeltoren kan worden. In het rapport W.R. 70-5 (1) "De pluim van een grote koeltoren" is een theoretisch model ontwikkeld om de pluimlengte te schatten. In referentie 2 is dit model in meer uitgewerkte vorm eveneens beschreven.

Om meer inzicht te krijgen in de diverse milieu-problemen die bij het gebruik van een koeltoren een rol spelen, worden in dit verslag op verzoek van de N.V. KEMA de volgende vragen behandeld:

- a. Zijn in het oosten des lands op grond van klimatologische verschillen gemiddeld andere pluimlengten te verwachten dan in De Bilt.
- b. Welke pluimlengten zijn in de zomermaanden te verwachten.
- c. Treden lange pluimen meer frequent in bepaalde richtingen op dan in andere richtingen?

Behalve op deze vragen zal in dit verslag wat uitvoeriger dan in W.R. 70-5 het geval was, worden ingegaan op mogelijke onzekere factoren in de toegepaste methode.

2. De bewerking van het waarnemingsmateriaal

Ten gevolge van het ontbreken van betere gegevens was, evenals in W.R. 70-5, de enige mogelijkheid het beschikbare theoretische model toe te passen op de resultaten van radiosonde-opstijgingen. Dit was reeds gedaan voor het winterhalfjaar met de gegevens van De Bilt, zodat enerzijds een zomerhalfjaar voor De Bilt bewerkt moest worden en anderzijds een jaar waarnemingen van een radiosonde-station, zo goed mogelijk representatief voor het oosten des lands. Voor dit laatste bleek het mogelijk om te beschikken over gegevens te Goch, West-Duitsland, ongeveer 15 km ten zuiden van Kleef. In Goch worden de waarnemingen slechts op werkdagen verricht en wel omstreeks 05.15 uur GMT, terwijl in De Bilt op alle dagen zowel rond 00 als 12 uur een opstijging plaatsvindt.

Van de radiosonde-waarnemingen zijn de oorspronkelijke registraties en de bijbehorende ijkings gebruikt om waarden voor de temperatuur, de relatieve vochtigheid, de windsnelheid en de windrichting op 100 m hoogte te schatten. Aan de hand van de bewolgingsgraad en de op 10 m hoogte gemeten windsnelheid is de Pasquill-verspreidingsklasse bepaald. Hierbij zijn enigszins andere criteria gehanteerd dan die welke bij de uitgewerkte voorbeelden in W.R. 70-5 zijn toegepast. De in dit verslag gegeven resultaten voor de wintermaanden te De Bilt wijken daarom in zeer geringe mate af van die welke eerder zijn gepubliceerd.

Voor de waarnemingen van Goch werd de keuze van de Pasquill-klasse bemoeilijkt door het feit dat een deel van de waarnemingen in de ochtendschemering plaats vond. Indien 's nachts de atmosfeer ten gevolge van uitstraling stabiel van opbouw is, vindt na zonsopgang door de instraling een overgang naar een onstabiele atmosfeer plaats. Van 6 april tot 6 mei en van 3 augustus tot 21 september is daarom voor de 06 uur waarnemingen te Goch aangenomen dat de atmosfeer neutraal van opbouw was (Pasquill-klasse D).

Geheel volgens de methode uit W.R.70-5 zijn vervolgens pluimlengten geschat voor een fictieve 500 MW-koeltoren. De gevonden pluimlengten zijn voor respectievelijk het zomer- en het winterhalfjaar cumulatief weergegeven in fig. 1. Bovendien geven de figuren 2 en 3 het voorkomen van lange pluimen in afhankelijkheid van de windrichting. Voor de windrichting is in alle gevallen de meting op 10 m hoogte gebruikt omdat in het materiaal van Goch de windwaarneming op 100 m hoogte vaak niet beschikbaar was. Uit de gevallen dat beide waarnemingen werden verricht blijkt overigens dat de zo gemaakte fout meestal gering is. In de figuren 2 en 3 zijn ook aangegeven de aantallen malen dat een bepaalde windrichting optrad, alsmede het aantal malen dat bij een gegeven windrichting mist voorkwam. Bij deze laatste gevallen is geen pluimberekening uitgevoerd.

3. De lengte van het zichtbare deel van de pluim

In fig. 1 is de overschrijdingskans van de aangegeven pluimlengten gegeven voor een 500 MW-koeltoren, volgens het in W.R.70-5 beschreven model. Deze figuur dient met reserve te worden gebruikt, omdat verscheidene factoren die mede bepalend zijn voor de lengte van de pluim, niet in rekening konden worden gebracht. Enkele van deze factoren worden in het onderstaande beschreven.

- 3.1. De in fig. 1 gebruikte pluimlengten zijn gemiddelden over een periode van 10 minuten. In het algemeen zal de pluim na enige afstand te hebben afgelegd in de vorm van flarden of plukken verder trekken. Ofschoon de waarnemer dan af en toe een flard ziet overdrijven, geeft de berekening aan dat hij gemiddeld over 10 minuten ter plaatse geen pluim waarneemt. De in werkelijkheid waargenomen pluimen kunnen dus langer zijn dan berekend.
- 3.2. Doordat te De Bilt vaker dan op de meeste plaatsen in Midden-Nederland de wind zwak is, komen in de berekeningen de Pasquill-klassen A en F (zeer onstabiel, zeer stabiel) meer frequent en klasse D minder frequent dan elders voor. Hierdoor wordt het verschil in voorkomen van pluimlengten te De Bilt om 00 uur en 12 uur overdreven. Naast mogelijke verschillen in het klimaat te Goch en te De Bilt kan de weinig representatieve windmeting te De Bilt mede oorzaak zijn van het gevonden (overigens geringe) verschil tussen de krommen De Bilt 00 uur en Goch 06 uur in het bovenste deel van fig. 1. De berekende kans op een zekere pluimlengte voor De Bilt om 12 uur in het zomerhalfjaar is - gelet op de ervaringen in het buitenland - waarschijnlijk te klein. Dit kan slechts voor een deel verklaard worden uit de genoemde onderschatting van de windsnelheid te De Bilt.
- 3.3. Mogelijk zal een koeling van 500 MW gerealiseerd worden door meerdere koeltorens te gebruiken, die vrij dicht bij elkaar zijn opgesteld. Een koeltoren voor kleiner vermogen zal bij overigens dezelfde omstandigheden een kortere pluim veroorzaken. De pluimlengte is ruwweg evenredig met de wortel van het gekoelde vermogen. Er dient echter rekening gehouden te worden met wisselwerking tussen de afzonderlijke pluimen. Daarom worden ongeveer dezelfde pluimlengten verondersteld, als bij gebruik van één koeltoren.
- 3.4. Het in W.R.70-5 gebruikte model berust mede op de door Pasquill en Gifford ontwikkelde theorie voor de berekening van de verspreiding van de emissie van een schoorsteen. In het geval van een koeltoren bestaat de emissie uit een grote hoeveelheid lucht die bijvoorbeeld 20°C verwarmd is en verzadigd is met waterdamp. Bij de verspreiding in de atmosfeer condenseert deze waterdamp grotendeels. Hierbij komt condensatiewarmte vrij. Dit heeft tot gevolg dat de pluim van een koeltoren zich enigszins anders gedraagt dan die van een "normale" schoorsteen.

- 3.4.1. Daar de pluim van een koeltoren in vergelijking met die van een "normale" schoorsteen een gering temperatuurverschil heeft met de omgeving maar dit temperatuurverschil aanmerkelijk langer houdt, gaat een koeltorenpluim langzaam, maar gedurende een langere tijd omhoog.
- 3.4.2. In het centrum van een pluim is het temperatuurexces het grootst (zie fig. 4). Dit heeft tot gevolg dat in het onderste en bovenste deel van de pluim de temperatuur respectievelijk neerwaarts en opwaarts afneemt. Het onderste deel van de pluim is dus stabiel van opbouw, het bovenste deel is instabiel. Enerzijds worden hierdoor in de pluim de turbulente bewegingen in de atmosfeer onderdrukt, anderzijds versterkt. Dit is ook waarneembaar: de onderzijde van de pluim is in het algemeen vlakker dan de bovenzijde. Voorts is in het eerste deel van de pluim de temperatuurafname met de hoogte in het bovenste deel zo sterk, dat delen van de pluim zich kunnen losmaken en omhoog gaan, om vervolgens met de omgeving te mengen en onzichtbaar te worden doordat de waterdruppeltjes weer verdampen. Ook dit is bij een koeltorenpluim waar te nemen.
- 3.4.3. Bij een schoorsteen kan bifurcatie optreden: Bij het verlaten van de schoorsteen ontstaat in de pluim een stijgende beweging in het centrum en een neerwaartse beweging aan de randen. Deze bifurcatie wordt versterkt door temperatuurverschillen in de pluim als in 3.4.2. beschreven en door afkoeling aan de zijden van het zichtbare deel van de pluim door verdamping van druppeltjes. In de pluim van een koeltoren wordt deze bifurcatie vaak waargenomen. Ofschoon de verschijnselen, die in 3.1 t/m 3.4 zijn genoemd, mede de lengte van de pluim bepalen, is het niet mogelijk met de huidige kennis deze in rekening te brengen. Zelfs is het niet mogelijk om aan te geven of de pluim in werkelijkheid langer of korter zal zijn dan berekend.

3.5. Conclusie

Afgaande op ervaringen in het buitenland, kan gesteld worden dat de kans op een zekere pluimlengte als weergegeven in fig. 1, de juiste orde van grootte aangeeft maar dat met name tijdens de zomerdag de pluimen langer kunnen zijn dan aangegeven (zie 3.2).

De resultaten als in fig. 1 weergegeven, geven géén aanleiding te veronderstellen dat er een belangrijk systematisch verschil te verwachten is tussen midden- en zuid/oost Nederland.

4. Mist, neerslag, gladheid

- 4.1. Het gebruik van een koeltoren kan mist, neerslag en gladheid in de omgeving veroorzaken om de volgende drie redenen:
- a. waterdruppeltjes worden door de luchtstroom in de koeltoren meegevoerd en vallen in de omgeving op de grond;
 - b. de pluim van de koeltoren strijkt over de grond;
 - c. bij lage temperaturen sneeuwt de koeltorenpluim uit.
- 4.2. In het buitenland zijn druppelvangers ontwikkeld die 95% van het in de luchtstroom meegevoerde vloeibare water (druppels groter dan 50 micron diameter) invangen. Indien deze op de juiste wijze worden toegepast, zal mist, neerslag en gladheid t.g.v. meegevoerd water vrijwel geheel vermeden kunnen worden.
- 4.3.1. Of de pluim van een koeltoren over de grond strijkt wordt in de eerste plaats bepaald door de hoogte van de koeltoren. In W.R.70-5 is aangetoond dat als deze enkele tientallen meters hoog is, zoals bij geforceerde trektorens, de pluim zeer frequent over de grond strijkt, zowel dicht bij de toren als op grote afstand. Om deze reden wordt er in het onderstaande verondersteld dat de koeltorens ruim honderd meter hoog zullen zijn. Bij in het buitenland in bedrijf zijnde torens is dit een normale afmeting.

- 4.3.2. Om na te gaan onder welke omstandigheden een koeltorenpluim de grond kan raken, is een schatting nodig van de z.g. effectieve schoorsteenhoogte. De pluim stijgt omdat hij bij de koeltoren warmer is dan de omgeving. De effectieve schoorsteenhoogte is een fictieve hoogte waarop men de bron van de pluim geplaatst kan denken. Vanaf deze hoogte laat men dan de pluim zich verspreiden, als ware deze niet warmer dan de omgeving. Mede op grond van ervaring in het buitenland menen wij de effectieve hoogte van een koeltoren, die zelf ruim 100 meter hoog is, op 150 meter te kunnen stellen.
- 4.3.3. Met behulp van het in W.R.70-5 beschreven model is nagegaan hoe vaak een koeltorenpluim over de grond zou strijken bij een effectieve schoorsteenhoogte van 100 en 150 m, voor de in 2. genoemde waarnemingsreeks voor Goch en De Bilt. Voor De Bilt zou dit voor een geheel jaar waarnemingen om 0 en 12 uur 7 respectievelijk 1 maal het geval zijn. Te Goch, voor een jaar waarnemingen op werkdagen om 06 uur respectievelijk 5 en 1 maal, eveneens voor effectieve hoogten van 100 en 150 meter. Hierbij is afgezien van gevallen waarin reeds mist aanwezig was. Zoals in 3.4.1 gesteld, gaat de pluim van een koeltoren langzaam, maar gedurende een lange tijd omhoog. In feite is het zichtbare deel van een pluim steeds warmer dan de omgeving. Om deze reden zou men verwachten dat de pluim beduidend minder frequent over de grond strijkt dan berekend. Bedacht moet worden dat door lokale omstandigheden, zoals de aanwezigheid van een koude rivier of van een vallei, neerwaartse luchtbewegingen voor kunnen komen, die de pluim dan meevoeren. Uit het dispersiemodel concluderen wij dat de pluim van een koeltoren hoger dan 100 meter niet dan bij hoge uitzondering hinder t.g.v. mist, neerslag of gladheid zal veroorzaken. Zie echter ook 4.3.4.
- 4.3.4. De pluim verlaat een koeltoren van grote afmetingen. In de onmiddellijke nabijheid staan gebouwen van een elektrische centrale. Vooral bij een flinke wind, als de pluim in bijna horizontale richting wegtrekt, kan deze worden ingevangen in de verstoorte luchtstroom aan de lijzijde van de koeltorens en van de omringende gebouwen. In het algemeen kan de luchtstroom verstoord zijn tot op tenminste 2x de hoogte van het obstakel en tot op een afstand aan de lijzijde van 5 tot 10 maal de hoogte. Onder deze omstandigheden kan de pluim aan de lijzijde van de obstakels tot op de grond gebracht worden. Ofschoon dit vrij frequent zal voorkomen bij een windsnelheid van bijvoorbeeld 5 m/s of meer, is in zulke gevallen in het algemeen het zichtbare deel van de pluim niet lang, zoals uit het volgende blijkt. Op 500 m afstand van een obstakel van 100 m hoogte en 100 m breedte zou naar schatting, als de dispersie van de pluim bij een windsnelheid groter dan 5 m/s voornamelijk door het zog achter de obstakels bepaald wordt, het enthalpie-exces aan de grond minder dan 1KJ/m^3 bedragen. Alleen onder extreme omstandigheden, te weten bij hoge relatieve vochtigheid en temperaturen rond het vriespunt of lager, is de pluim dan nog zichtbaar. Zie hiervoor W.R.70-5 fig. 4. Op grond van de in dit rapport gebruikte meetreeks zou te Goch dit misschien een enkele maal voorkomen en te De Bilt in het geheel niet. OVERCAMP et al. (3) hebben model-proeven verricht om na te gaan boven welke windsnelheid een koeltorenpluim met "het zog" van de koeltoren kan interfereren. Als het getal van Froude voor een koeltoren op circa 0,75 gesteld wordt, blijkt uit de resultaten van deze auteurs dat alleen bij windsnelheden groter dan 7 m/s de - al dan niet zichtbare - pluim op afstanden van 2 à 4 maal de hoogte van de koeltoren de grond kan raken. Op grond van de in dit rapport beschouwde jaar waarnemingen zou dan noch te Goch, noch te De Bilt het zichtbare deel van de pluim de grond raken. Op grond van het bovenstaande mag niet geheel worden uitgesloten dat t.g.v. downwash, sterk afhankelijk van de lokale situatie, bij tenminste vrij krachtige wind de pluim van een koeltoren tot op een afstand van ruim 500 meter de grond zal kunnen raken. Of dit in werkelijkheid zal gebeuren, wordt mede bepaald door de lokale omstandigheden.

- 4.4. Bij temperaturen lager dan -5°C kunnen sommige vormen van luchtverontreiniging als vrieskern fungeren en mist doen uitsneeuwen. In de laatste jaren is een dergelijk verschijnsel een paar maal aan het K.N.M.I. gerapporteerd. Ook in referentie (4) wordt een waarneming van dit verschijnsel beschreven. Vrieskernen die van nature in de atmosfeer aanwezig zijn, fungeren pas bij een temperatuur van -10 à -15°C .

Voor de vorming van sneeuwvlokken is enige tijd, in de orde van 10 à 20 minuten nodig. Er dient daarom rekening gehouden te worden met de mogelijkheid dat bij strenge vorst en zwakke wind op enige afstand van de koeltoren lichte sneeuwval op zal kunnen treden.

4.5. Conclusie

Voor zover thans is te overzien, is voor een koeltoren van tenminste 100 m hoog, voorzien van een goede druppelvanginrichting, in het algemeen geen ernstige hinder t.g.v. mist, neerslag of gladheid te verwachten.

Op grond van bovenstaande theoretische beschouwingen mag niet worden uitgesloten dat bij hoge uitzondering, voornamelijk in de winter, de koeltorenpluim over het aardoppervlak zou kunnen strijken. Met name lijkt dit mogelijk binnen een afstand van circa 500 meter van de koeltorens.

Bij strenge vorst en zwakke wind moet lichte sneeuwval op enige afstand niet worden uitgesloten.

5. De afhankelijkheid van de pluimlengte van de windrichting

Daar voor het bepalen van de pluimlengten gegevens op 100 meter hoogte nodig zijn, is het thans niet wel mogelijk een afgeronde klimatologie op te stellen van het voorkomen van zekere pluimlengten als functie van de windrichting. Gezien de gegevens, weergegeven in fig. 2 en 3, kan echter gesteld worden, dat het aantal gevallen waarbij een zekere pluimlengte optreedt, globaal genomen voor alle windrichtingen hetzelfde is. Het lijkt niet waarschijnlijk dat bij bewerking van meer uitgebreid waarnemingsmateriaal, zeer uitgesproken voorkeursrichtingen voor langere pluimen zullen blijken te bestaan.

6. Dankbetuiging

In dit rapport is onder meer gebruik gemaakt van waarnemingsmateriaal, bereidwillig ter beschikking gesteld door de Geophysikalischer Messzug Lw2 in Goch (Duitse Bondsrepubliek). Bij de verkrijging van dit materiaal was Majoor J.H. Boer van de Koninklijke Luchtmacht behulpzaam. De berekeningen van pluimlengten werden onder leiding van de heer J. Muysert uitgevoerd door assistenten van Sectie III van de 3e Afdeling van het K.N.M.I.

Literatuur

1. WESSELS, H.R.A. en
WISSE, J.A. (1970) De pluim van een grote koeltoren.
Wetenschappelijk Rapport W.R. 70-5, K.N.M.I.
De Bilt.
2. WESSELS, H.R.A. en
WISSE, J.A. (1971) A method for calculating the size of cooling
tower plumes, Atmospheric Environment, vol. 5,
1971, pag. 743-750.
3. OVERCAMP, Th.J. and
HOULT, D.P. (1971) Precipitation in the wake of cooling towers.
Atmospheric Environment 5 p. 751-765.
4. AGEE, E.M. An artificially induced local snowfall.
Bull. of the Am. Met. Sec. 52 (1971), pag.
557.

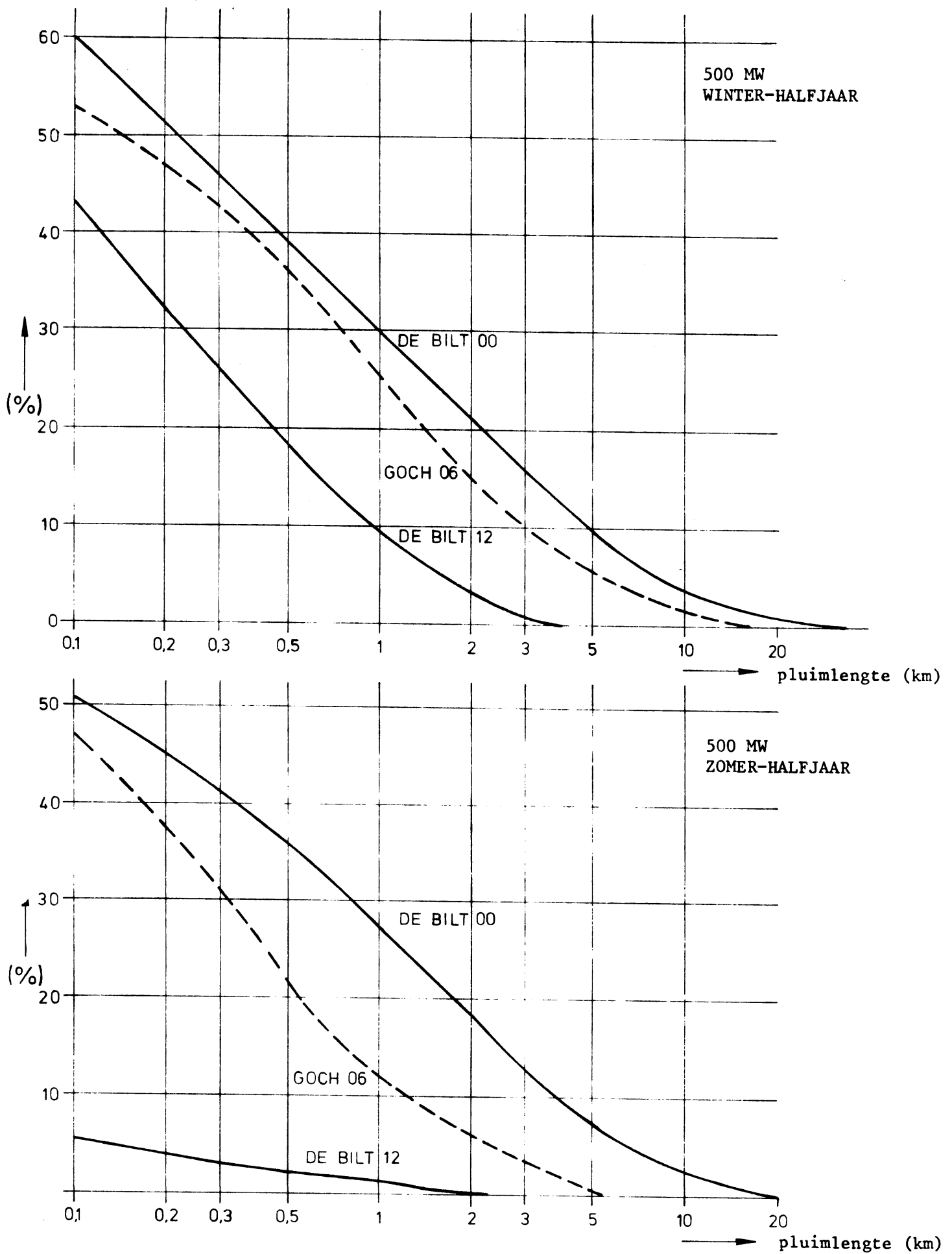


Fig. 1 Schatting van de overschrijdingskans van de langs de abscis aangegeven pluimlengten berekend respectievelijk voor het winterhalfjaar en het zomerhalfjaar uit de bij de krommen aangegeven radiosonde-opstijgingen.

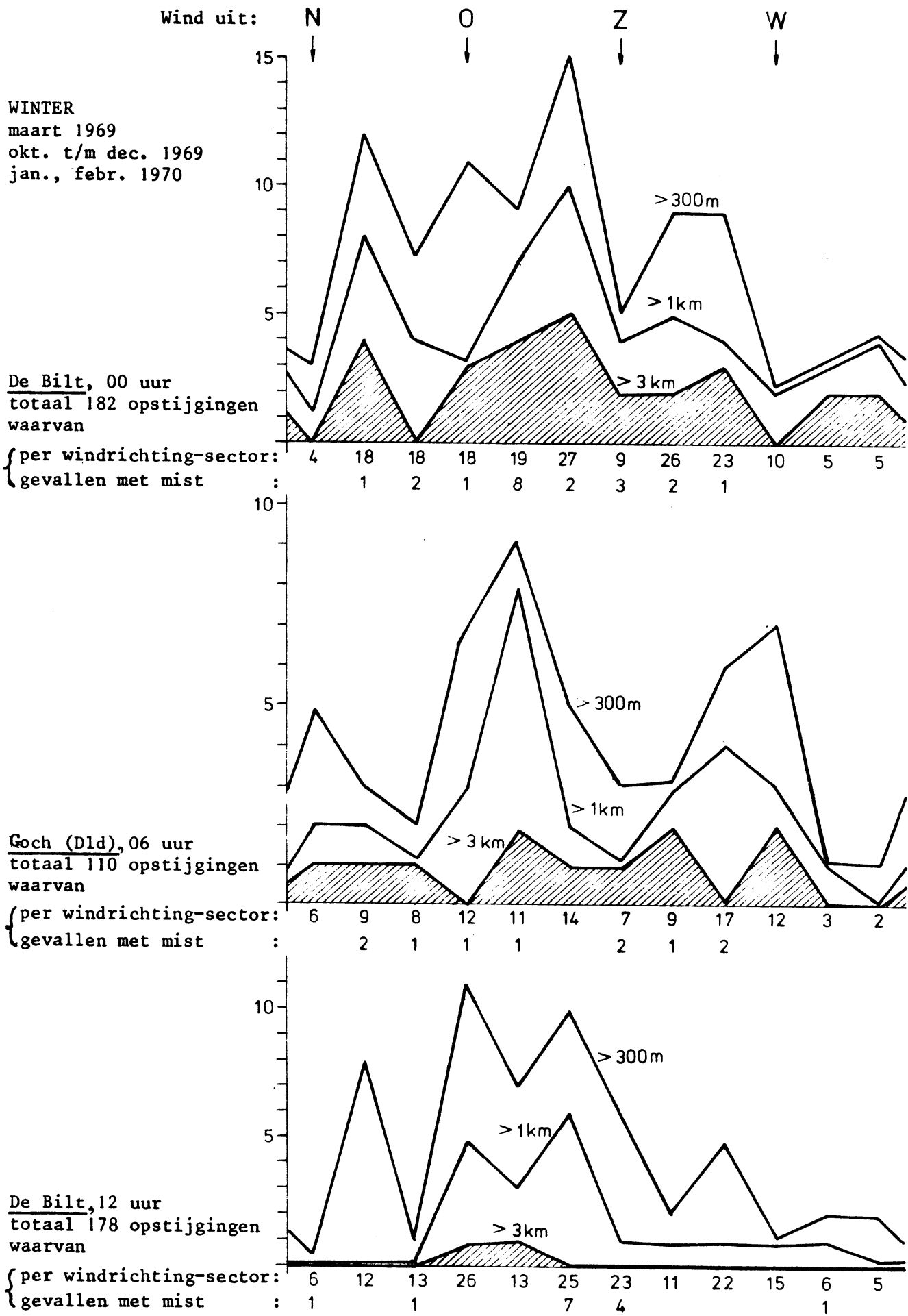


Fig. 2 Aantal berekende pluimen, langer dan de aangegeven lengte, verdeeld over windrichting (per 30°)

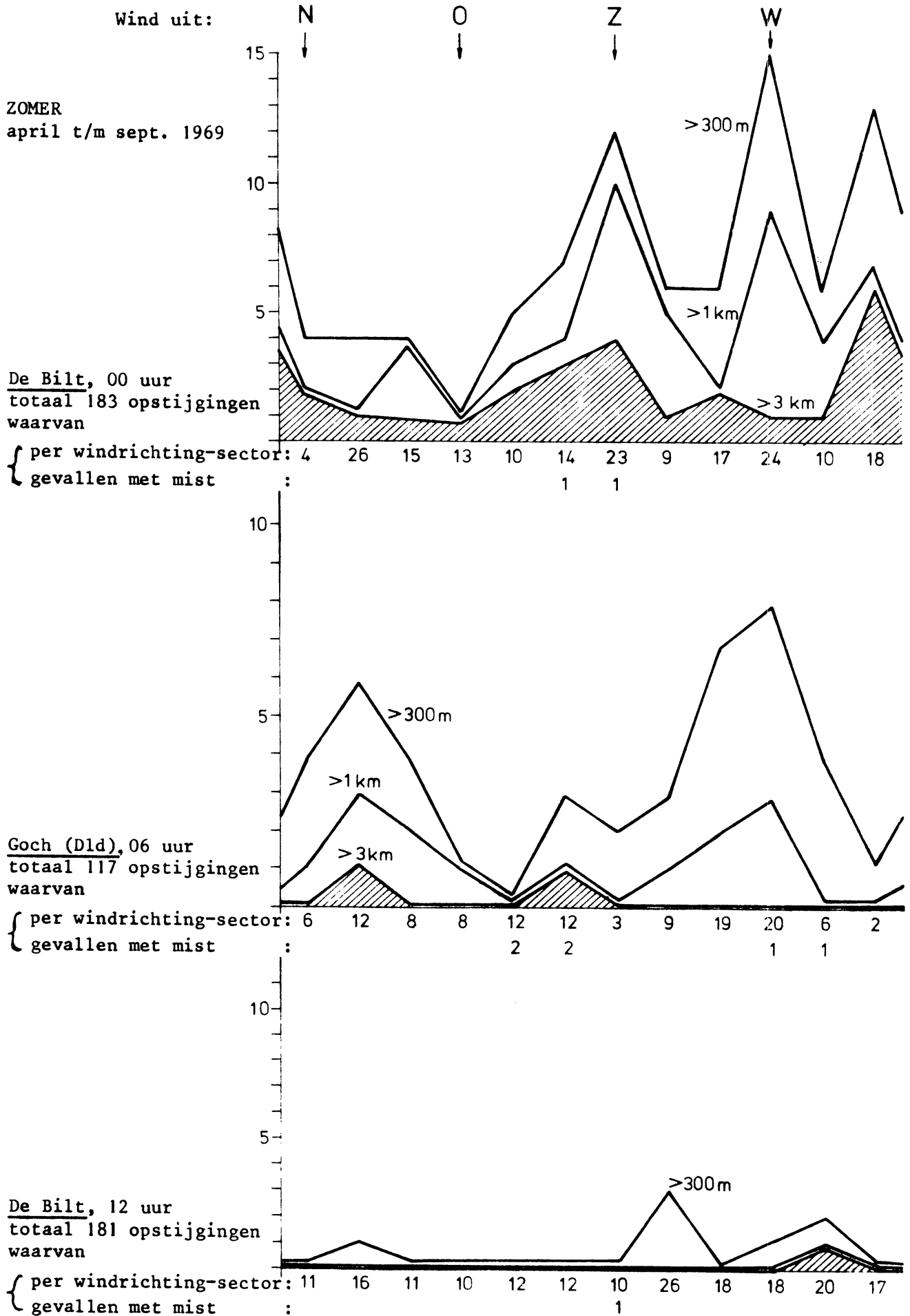


Fig. 3 Aantal berekende pluimen, langer dan de aangegeven lengte, verdeeld over windrichting (per 30°)

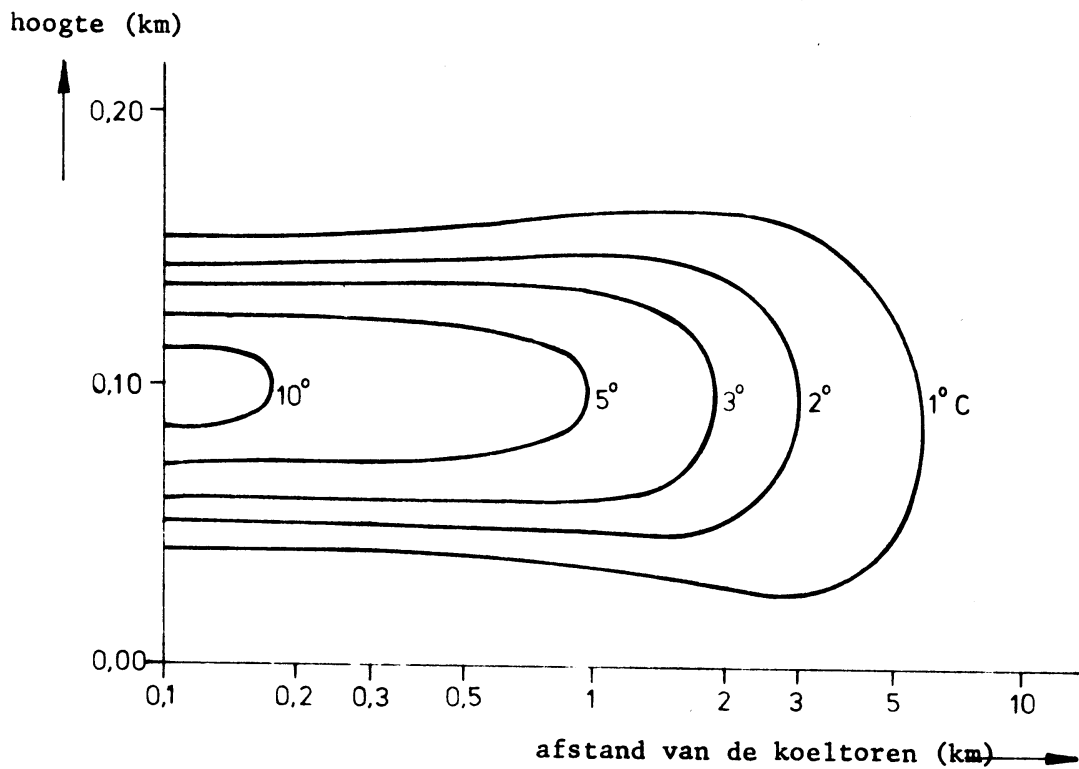


Fig. 4

Vertikale temperatuurverdeling in graden Celsius in de pluim van een 500 MW koeltoren volgens het gebruikte dispersiemodel, waarbij de pluimstijging uitsluitend direkt ter plaatse van de koeltorens gedacht is. Effectieve hoogte 100 meter, windsnelheid 2 m/s, Pasquill-klasse C. Omgeving 0°C, 100% relatieve vochtigheid.

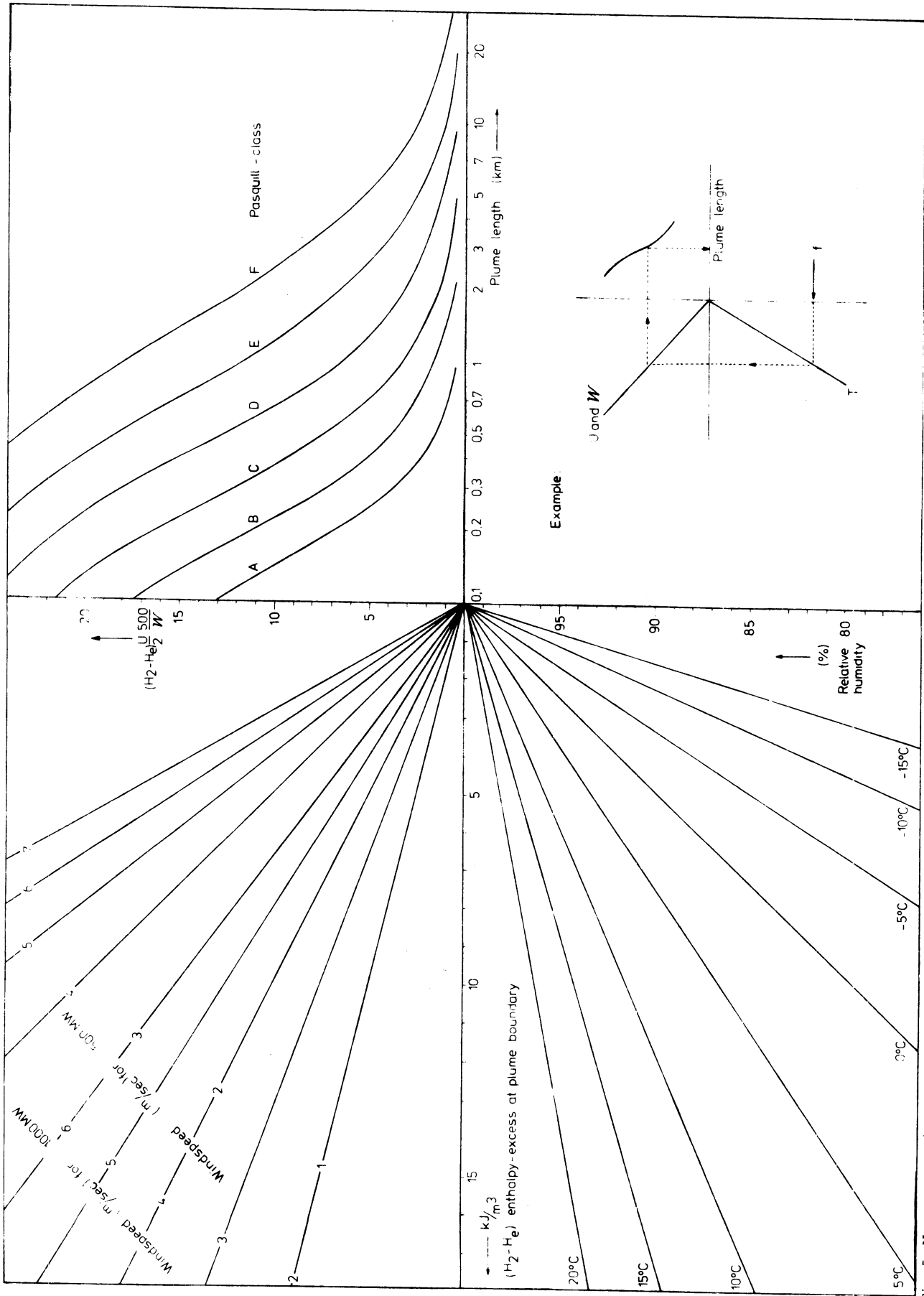


Fig. 5. Nomogram, ontworpen om pluimlengten te berekenen voor koeltorens, die de enthalpie van de doorstromende lucht met 45 kJ/kg verhogen. Aangenomen is een uitstroombopening met een diameter van 60 m en een effectieve bron-hoogte van 100 m. De relatieve vochtigheid f en de temperatuur T van de niet gestoorde lucht op het niveau van de pluim worden in het derde kwadrant ingevoerd om het enthalpie-exces H_2-He voor het einde van de zichtbare pluim te vinden. Door middel van het vierde kwadrant kan rekening worden gehouden met de windsnelheid (op 100 m hoogte) en het gekoelde vermogen. Tenslotte wordt in het eerste kwadrant met behulp van de Pasquill-klasse een schatting van de pluimlengte verkregen. Voorbeeld: Met $T = 5^\circ C$, $f = 90\%$, $u = 3$ m/s, $W = 500$ MW en Pasquill-klasse E volgt voor de pluimlengte 1100 m.