



KONINKLIJK NEDERLANDS METEOROLOGISCH INSTITUUT

**HOZEN EN
HOZENTHEORIEËN**

DOOR

A. DELVER

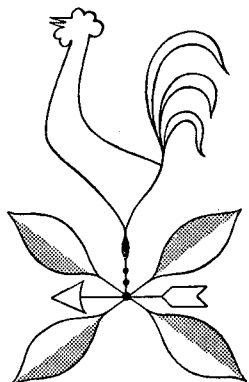
VERSPREIDE OPSTELLEN

2

PUBLICATIENUMMER: KNMI 137-2

STAATSDRUKKERIJ- EN UITGEVERIJBEDRIJF, 'S-GRAVENHAGE 1955

KONINKLIJK NEDERLANDS METEOROLOGISCH INSTITUUT



Hozen en Hozentheorieën

door A. Delver

wetenschappelijk assistent
aan het KMNI

VERSPREIDE OPSTELLEN 2

Voorwoord

OP het eerste gezicht lijkt het merkwaardig, dat het tweede deeltje van „Verspreide Opstellen” aan het hozenvraagstuk wordt gewijd. De hozenfrequentie is in ons land niet groot, met hoosverschijnselen zijn in Nederland geen bijzondere economische belangen gemoeid en het probleem van de hoosvorming is wetenschappelijk gesproken, evenmin buitengewoon klemmend.

De hozen, die in 1925 te Borculo vrij aanzienlijke schade aanrichtten, brachten de Hollandse meteorologen echter in direct contact met dit merkwaardige en zeker interessante verschijnsel. De toenmalige hoofd-directeur van het K.N.M.I., Prof. VAN EVERDINGEN, beschreef in de Proceedings van de Koninklijke Academie van Wetenschappen (Volume XXVIII, blz. 871, meeting of 31 October 1925) de windhozen van Borculo uitvoering, theoretiseerde over hun ontstaan en wekte medewerkers en amateurs op tot verdere studie en waarneming. Het is vooral de ons in de oorlog ontvallen Dr M. PINKHOF geweest, die als begaafd vrijwillig waarnemer en enthousiast redactie-secretaris van het tijdschrift „Hemel en Dampkring” de belangstelling voor de windhozen in Nederland gaande hield. Geheel in overeenstemming met de door hem vóór 1940 geschapen traditie werden na het optreden van de zware windhoos van 1950 op de Veluwe, baan en weersomstandigheden ter plaatse onderzocht. De daarbij opnieuw gewekte belangstelling, alsmede voorafgaande en volgende literatuurstudies, brachten de heer A. DELVER, wetenschappelijk assistent bij het K.N.M.I., tot de samenstelling van een uitgebreid rapport omtrent de huidige stand van het hozenvraagstuk, dat thans aan een bredere kring van belangstellenden wordt aangeboden.

*De Directeur in Algemene Dienst
bij het K.N.M.I.,*

Prof. Dr W. BLEEKER

Inhoud

blz	
8	1 Inleiding
9	2 Korte algemene beschrijving van het verschijnsel
9	21 Land- en waterhozen
13	22 Stof- en zandhozen
14	23 Hozen, die in de vrije atmosfeer bij grote branden optreden
15	24 Experimentele hozen
17	3 Enkele resultaten van het onderzoek naar de bij hozen voorkomende bijzonderheden
17	31 De samenhang met cumulonimbus
18	32 De samenhang met een neerslaggebied
19	33 De plaats binnen of buiten het neerslaggebied
20	34 Nadere oriëntatie ten opzichte van het neerslaggebied
22	35 Het bewegingsveld
22	351 De horizontale beweging
27	352 De verticale beweging
33	36 Het horizontale drukveld
38	4 Ontstaanstheorieën
38	41 Inleiding
38	42 De theorie van Roszmann
41	43 De theorie van Showalter
43	44 De mechanische theorie
43	441 De theorie van Wegener
53	442 De theorie van Tepper
55	45 De thermo-dynamische theorie
55	451 Algemeen
63	452 Bizondere vormen van de thermo-dynamische theorie
63	4521 De theorie van Fulks
64	4522 De theorie van Koschmieder
66	4523 De theorie van Bleeker en Delver

Abstract

A GENERAL description of windspouts, tornadoes, dustdevils, fire-tornadoes and experimental tornadoes is given and the results of an investigation of about 300 descriptions of windspouts and tornadoes are discussed in detail. It appears that windspouts and tornadoes develop exclusively under convective clouds. If no precipitation occurs only windspouts of minor importance may form. Well developed windspouts and tornadoes occur exclusively under cumulonimbus clouds from which precipitation is falling, or, in a very few cases, is about to fall. They are found outside the precipitation area. From the data on hand no distinct preference of the phenomenon for front edge, back edge, left edge or right edge of the precipitation area can be shown to exist. Very heavy windspouts or tornadoes may occur in places more or less surrounded by precipitation.

The observational data lead to the conclusion, that all windspouts and tornadoes are rotating, though the rotation is often difficult to observe. Outside the tropics there is a significant preference for the cyclonic sense of rotation. The statement made by Wegener, that anti-cyclonically rotating whirls occur particularly over water-surfaces, cannot be affirmed. Sometimes a "hollow core" is observed, which is explained as

an effect of the interaction of centrifugal and centripetal forces. The evidence of the existence of downward motion in the core of the upward current must be considered unsatisfactory.

From computations, based on temperature and humidity data of the air involved, and from direct observations, it appears that in the centre of a well-developed windspout or tornado the pressure may be 50—200 mb below the pressure in the environment.

The theories of windspouts and tornadoes put forward by MÜGGE (1927), ROSZMANN (1951), SHOWALTER (1943), WEGENER (1917), TEPPER (1950), FULKS (1943) and KOSCHMIEDER (1940) are subjected to a critical discussion. Attention is drawn to the theory of BLEEKER and DELVER (1951), in which the accompanying precipitation as well as recent advances in knowledge of thunderstorm structure are fully recognised. The adjacent precipitation is considered as the main factor in windspout or tornado development. The new theory further admits a simple interpretation of the occurrence of more than one windspout under one cloud, of the fact that heavy windspouts or tornadoes are often accompanied by hail, and of the occasional formation of the whirl some time before the precipitation begins to fall.

1 Inleiding

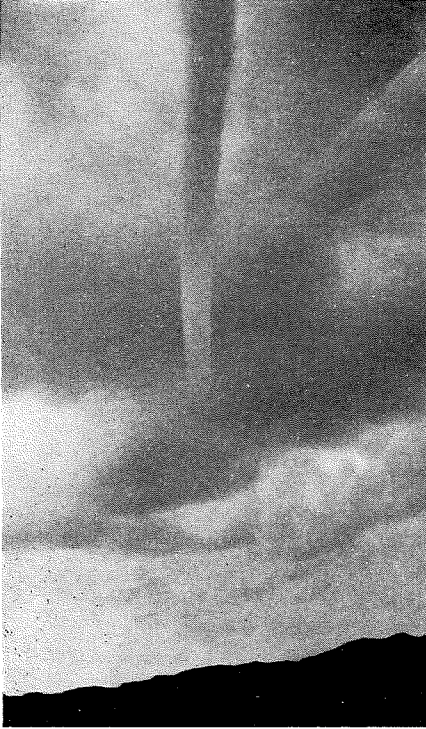
Voor dit onderzoek werd kennis genomen van de meeste in de loop der jaren verschenen publicaties die enig licht konden verspreiden over de structuur van luchtwervels met beperkte diameter in het algemeen en de ontstaanswijze van hozen in het bijzonder. De verschillende ontwikkelingstheorieën werden onderling vergeleken en getoetst aan een grote hoeveelheid feitenmateriaal. Hiertoe werd kennis genomen van de hoos- en tornadobeschrijvingen in de jaargangen van „Hemel en Dampkring”, de Amerikaanse „Monthly Weather Review” en de Engelse „Marine Observer” van 1925 tot 1949. Daarnaast werd nog een vrij groot aantal beschrijvingen van hozen uit andere bronnen in het onderzoek betrokken. Zodoende konden van 295 hozen, waaronder 108 zuivere landhozen en 166 zuivere waterhozen * de bijzonderheden worden verwerkt. Bij de landhozen bevonden zich 50 Amerikaanse tornado's. Deze getallen geven slechts een ruw beeld van de uitgebreidheid van het onderzoek; in sommige gevallen immers is de beslissing of men een verschijnsel als één dan wel als meer hozen zal opvatten tamelijk willekeurig. Dit is bijvoorbeeld het geval als een hoos verdwijnt en later weer uit ongeveer dezelfde plaats in de wolk te voorschijn komt.

Bij het uittellen van een bepaalde eigenaardigheid van hozen om een beeld te krijgen van de in de natuur voorkomende frequentie van die eigenaardigheid, werden alleen die beschrijvingen in aanmerking genomen, waarvan verondersteld mocht worden dat zij niet juist *ter wille van* die eigenaardigheid gegeven waren. Desondanks zullen de gevonden frequenties van de verschillende van het normale afwijkende bijzonderheden nog wel iets groter zijn dan met de werkelijkheid overeenkomt, daar vooral de waarnemers op zee, waar in sommige gebieden een hoos een vrij gewoon verschijnsel is, op de duur het beschrijven van een hoos zonder opvallende bijzonderheden achterwege zullen laten.

* Onder land- respectievelijk waterhozen wordt verstaan hozen die boven land- respectievelijk wateroppervlak voorkomen.

2 *Korte algemene beschrijving van het verschijnsel*

21 Land- en waterhozen



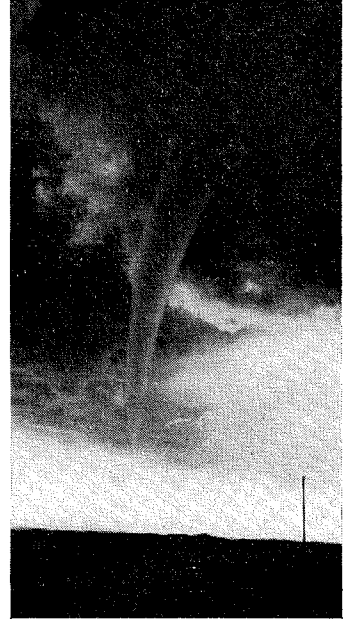
Figuur 1. Hoos nabij Camperduin, 29 VIII 1935.

Foto mej. T. Heyligers, Utrecht.

Aan de onderkant van een meestal zeer dreigend uitziende cumulonimbus verschijnt een naar beneden gerichte trechtervormige uitstulping, die onder meest cyclonale draaiing* om zijn as, een enkele maal gepaard gaande met slangachtige bewegingen, zich naar beneden tot een slurf verlengt, terwijl inmiddels in een beperkt gebied aan het aardoppervlak zich een wervelachtige storing gaat verraden. Bij volledige ontwikkeling breidt de slurf zich verder naar beneden uit, totdat de punt contact maakt met het centrum van de storing aan het aardoppervlak. De hoos bevindt zich meestal aan de rand van de wolk en buiten het neerslaggebied. Soms staat hij vrijwel verticaal, vooral als hij krachtig ontwikkeld is, maar meestal staat hij ietwat scheef en is hij min of meer gebogen. In vele gevallen gaat de ontwikkeling niet zo ver dat de slurf van condensatie de aardoppervlakte bereikt; soms treedt dan aan de grond geen merkbare storing op, soms wel, ja het ge-

beurt zelfs dat de wervelwind aan het aardoppervlak wèl wordt waar-

* Een draaiende beweging heeft een cyclonale draaiingszin, indien de beweging, geprojecteerd op het equatorvlak van de aarde, in dezelfde zin geschiedt als de wenteling van de aarde.

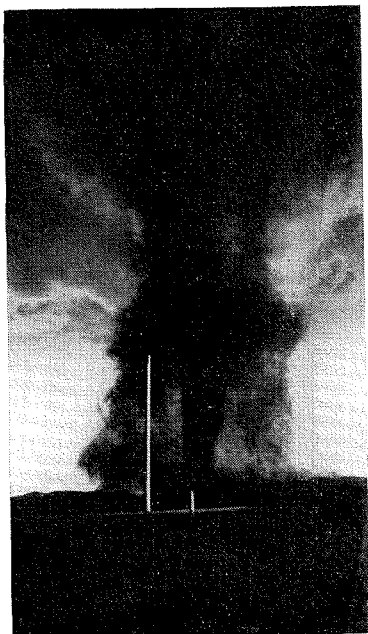
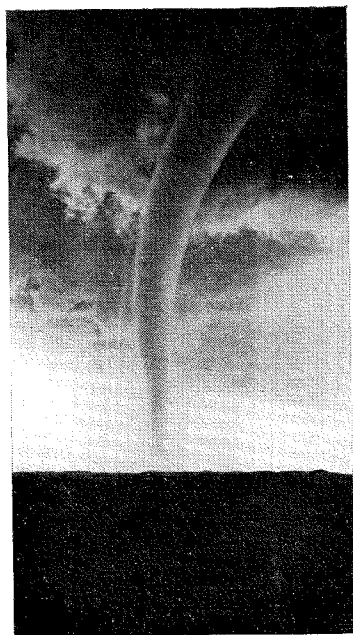


Figuren 2, 3, 4 en 5. Opeenvolgende ontwikkelingsstadia van een Noord-Amerikaanse tornado — Nebraska, 24 VI 1930 —. Op de laatste foto is duidelijk zichtbaar hoe stof en zand worden opgezogen.

Foto U.S. Weather Bureau - Mrs Ray Homer.

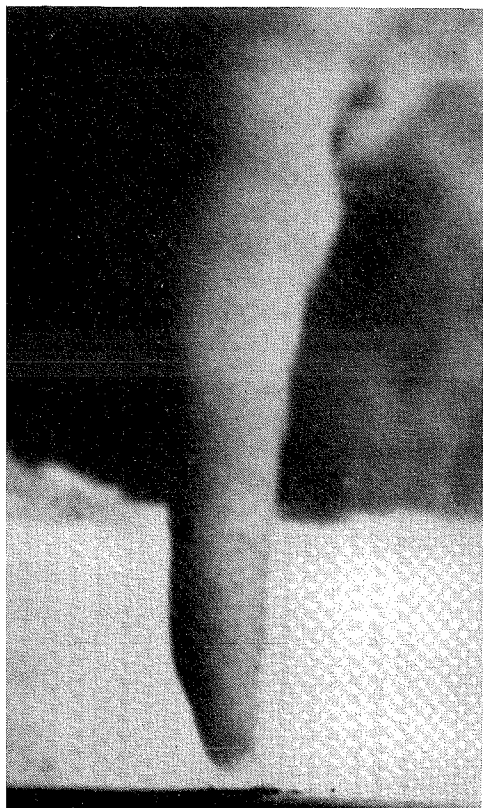
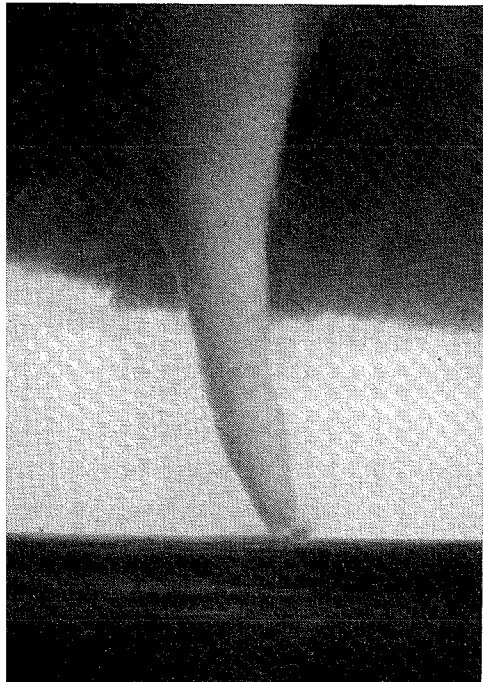
genomen maar dat de typische slurf geheel ontbreekt, of onder aan de wolk slechts een kolkende beweging is waar te nemen. In dit geval spreekt men naar het voorbeeld van Wegener van een blinde hoos. Vrij vaak komt het voor, dat meer dan één hoos zich gelijktijdig onder één wolk voordoet. De levensduur van een hoos varieert van enige seconden tot langer dan een uur; uit de door Wegener²⁴⁾ samengestelde statistiek van levensduren van Europese hozen volgt een gemiddelde duur van ongeveer 25 minuten.

Soms is binnen in de slurf een, al naar de achtergrond lichte of donkere, kern zichtbaar, die op een condensatievrije ruimte schijnt te wijzen, waardoor in dat geval de slurf doet denken aan een buis — figuur 18. Een enkele maal schijnt zich in deze buis zelfs een tweede condensatiecylinder te bevinden.



Een bijzondere plaats onder de hozen wordt ingenomen door de Noord-Amerikaanse tornado's *, die zich in enige opzichten min of meer van de zich elders vertonende hozen onderscheiden. Zo is de slurf van de tornado dikker, het spoor dat hij aan de grond nalaat breder en langer, de begeleidende neerslag meestal heviger, de leeftijd langer en vooral: de optredende windsnelheden zijn groter. Kortom, de Noord-Amerikaanse tornado – figuren 2-7 – is van zwaarder kaliber en daardoor veel gevaarlijker dan de meeste in andere gebieden voorkomende hozen, zodat hij veelal tientallen doden veroorzaakt. Verder blijkt de tornado meer dan de andere hozen gebonden te zijn aan kou-

* Niet te verwarren met de hevige onweersbuien van dezelfde naam aan de westkust van aequatoriaal Afrika.



fronten *, terwijl de trekrinchting overwegend noordoost is. Tenslotte is bij de tornado de draaiingszin bijna onveranderlijk cyclonaal, terwijl bij de overige hozen het overheersen van de cyclonale draaiingszin minder opvallend is. De tornado's zijn ten westen van de Rocky Mountains vrijwel onbekend terwijl ze in het stroomgebied van de Mississippi en zijn zijrivieren het veelvuldigst voorkomen, met een maximum in het voorjaar. Dit laatste hangt waarschijnlijk samen met het feit, dat in die tijd het temperatuurverschil tussen de uit Canada afkomstige koude lucht en de praefrontale warme lucht uit de Golf van Mexico het grootst is, waardoor de frontverschijnselen zeer intensief zijn.

Door dit alles nemen de tornado's onder de hozen wel is waar een bijzondere plaats in, maar daar de verschijningsvorm in wezen niet met die van elders optredende land- en waterhozen verschilt, doch zich daarentegen slechts gradueel hiervan onderscheidt, zullen wij het voorbeeld van Amerikanen als Humphreys²⁾ en Hurd³⁾, die de tornado principieel van de hoos onderscheiden, hier niet volgen. Waar hierna over hozen gesproken wordt, zijn derhalve tornado's, tenzij anders wordt vermeld, inbegrepen.

* Zo gaven analyses¹⁾ van de situaties tijdens de van 1916–1937 over Nebraska voorkomende 121 tornado's als resultaat, dat hiervan 68 % met zekerheid en 27 % waarschijnlijk met een koufront samenhang. Voor een warmtefront waren deze getallen 1 % resp. 3 %. Omtrent de resterende 1 % kon niets worden vastgesteld. Van deze tornado's kwam 86 % in de zuidelijke helft van de bijbehorende depressies voor.

Figuur 6 (boven). Slurf van een tornado in Kansas, U.S.A., 2 VI 1929.

Figuur 7 (onder). Zelfde tornado op een ander tijdstip.

Foto's U.S. Weather Bureau - Ira B. Blackstock.

22 Stof- en zandhozen

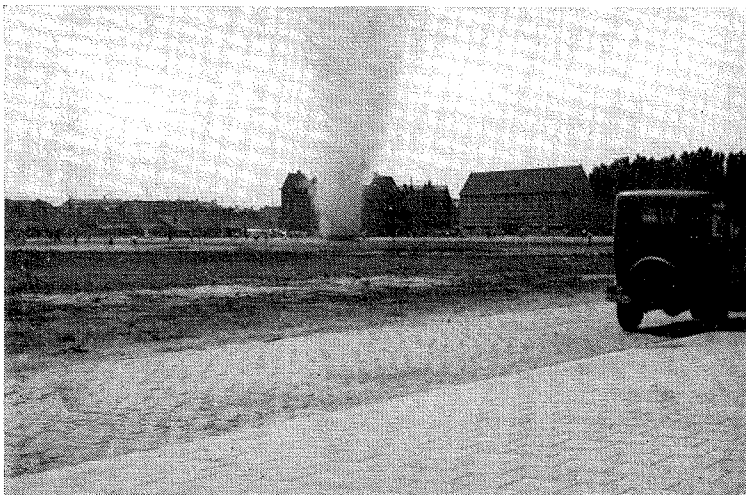
Deze komen soms tot ontwikkeling boven een vlak terrein (woestijn, steppe, zandverstuiving) waar krachtige zonnestraling bij rustige atmosfeer sterk over-adiabatische verticale temperatuurgradiënten * veroorzaakt. De plaatselijk naar boven stijgende lucht geeft dan onder gunstige omstandigheden – waarover later – aanleiding tot de vorming van een verticale wervel, waarbij zand en stof tot soms enige honderden meters worden omhoog gevoerd. Het kenmerkende verschil met de eerste categorie is, dat deze wervels niet met een wolk samenhangen, geen condensatie vertonen zodat de slurf ontbreekt, en dat zij verder in alle opzichten minder intensief zijn.

* De verticale temperatuurgradiënt is adiabatisch resp. overadiabatisch als de luchttemperatuur per 100 m stijging 1° C resp. meer dan 1° C afneemt.



Figuur 8. Typische zandhoos, ca 600 m hoog, in de Utah woestijn, U.S.A. De trekrichting is van links naar rechts.

Foto Ronald L. Ives, Denver, U.S.A.



Figuur 9. Stofhoosje boven een Rotterdams voetbalveld, 16 VII 1934. Hoogte ca 70 m, doorsnede 5 m. Duur 5 min.

Foto Jhr H. P. F. Coenen.

23 Hozen, die in de vrije atmosfeer bij grote branden optreden

De meest belangwekkende voorbeelden hiervan zijn de hozen die optreden bij de grote oliebrand in San Louis Obispo, California⁴). Het periodiek overkoken van de brandende tanks veroorzaakte telkens een enorme extra warmte-ontwikkeling en werd vergezeld van een groot aantal „hozen”, soms twintig tegelijk, die zich als slurven aan het oog vertoonden, zodat er blijkbaar ook condensatie in plaats vond. In de loop van de bijna vier etmalen dat dit overkoken met tussenpozen plaats had, ontstonden enige honderden van dergelijke „hozen”, die soms cyclonaal, soms anticyclonaal om hun as draaiden en zich maximaal tot 5 km van de brand verwijderden. De opwaartse beweging in deze wervels deed niet onder voor die in hozen welke op de gewone wijze ontstaan, hetgeen blijkt uit het feit, dat door één er van een heel huis tot 100 m hoogte in de slurf werd getild.

Eveneens wordt melding gemaakt van het optreden van grote hozen bij de uitgestrekte branden, die in 1923 in Tokyo en Yokohama als gevolg van aardbevingen ontstonden⁵).

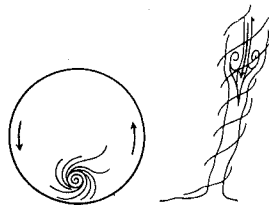
Ook bij bosbranden komen dergelijke hozen voor⁵¹).

24 Experimentele hozen

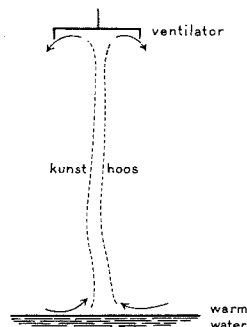
De eerste, die zich met de studie hiervan bezig hield was F. Vettin⁶⁾, die in 1857 proeven nam met een, om zijn verticale as langzaam draaiende, cilindrische glazen trommel. Door een meedraaiende verwarmingsbron werd steeds een zelfde plek van de bodem verhit. De langs spiraalvormige banen naar deze plek toestromende lucht vormde hier een wervel, die met tabaksrook werd zichtbaar gemaakt – figuur 10. Bij een plotseling versnelde of vertraagde draaiing van de trommel bleek de wervel achter te blijven resp. vooruit te lopen ten opzichte van de verwarmde plek van de bodem en vervolgens langzaam te verdwijnen, terwijl zich boven het verwarmde gedeelte een nieuwe wervel vormde. Vettin stelde vast, dat de verticale beweging in de wervel in hoofdzaak naar boven gericht was, doch dat zich in de kern van het bovenste gedeelte van de wervel ook een naar beneden gerichte stroming voordeed – figuur 10 rechts.

Een ander experimentator, M. Weyer⁷⁾, liet een ventilator met verticale schoepen boven een enigszins verwarmd wateroppervlak draaien, waarbij een hoos van wel drie meter lengte tussen ventilator en wateroppervlak ontstond – figuur 11. De ventilator was zodanig geconstrueerd, dat de aangezogen en vervolgens zijwaarts gestuwde lucht door middel van een verticale rand weer naar beneden werd gericht. Merkwaardig was, dat evenals soms in de natuur binnen in de zuil van tot fijne druppeltjes gecondenseerde waterdamp een condensatievrije kern viel waar te nemen, waardoor de hoos op een holle pijp leek.

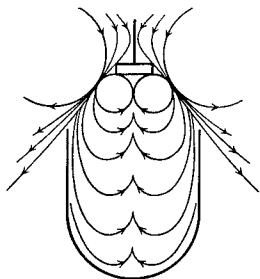
Op overeenkomstige wijze maar op kleinere schaal werden door J. Letzmann⁸⁾ hoosjes te voorschijn geroepen. Tevens sondeerde hij het bewegingsveld, waarbij bleek, dat de zijwaarts naar beneden weggestuwde lucht volgens de in figuur 12 aangegeven stroomlijnen gedeeltelijk weer naar binnen en naar boven stroomt, zoals te verwachten was. Ook Letzmann constateerde dat zijn hoosjes hol waren. Dit bleek eveneens het geval te



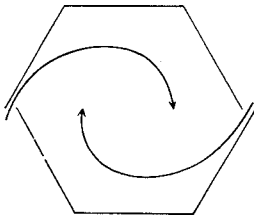
Figuur 10. Proef met de draaiende trommel van Vettin.
Links: Horizontaal aanzicht van de trommel met de wervel.
Rechts: Verticaal aanzicht van de wervel.



Figuur 11. Proef met draaiend schoepenrad van Weyer.



Figuur 12. Verticale beweging bij een door Letzmann met behulp van een schoepenrad boven een vat veroorzaakte wervel. Bij voldoende vochtigheid deed zich om de hartlijn een kunsthoosje voor.



Figuur 13. Opstelling van de wanden bij de proef van Dines (bovenaanzicht).

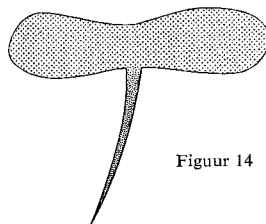
zijn bij de kunsthozen van W. H. Dines⁹⁾, die 60 cm lang waren en waarbij de omstandigheden in zoverre anders waren, dat de lucht door een gat in het midden van de bovenwand van een bijna gesloten ruimte werd weggezogen. De zijwanden van deze ruimte waren zodanig geplaatst, dat hierdoor de binnenstromende lucht reeds enige draaiing verkreeg – figuur 13. Bij voldoende vochtigheid van de lucht ontwikkelde zich onder het gat een hoosje.

3 Enkele resultaten van het onderzoek naar voorkomende bijzonderheden

31 De samenhang met cumulonimbus

Van de 295 gevallen bleek deze samenhang in 248 met zekerheid te bestaan, hetzij dat dit letterlijk werd medegedeeld, hetzij dat het uit de beschrijving van nevenverschijnselen (onweer, hagel, slagregen) volgde. Er waren 42 beschrijvingen die zich op dit punt niet uitlieten, terwijl slechts 5 op een verbonden zijn aan gewone cumulus wezen. De bijzonderheden over deze laatste, blijkbaar zeldzame gevallen volgen hieronder:

- a. Nieuwer Amstel, 10 IX 1927¹⁰). „De slurf bevond zich juist midden in de loodzwarte wolk, die ongeveer het model had van een zandloper – figuur 14, naar schatting 300 bij 150 m omvang had en zich zeer langzaam verplaatste. Ik ben absoluut zeker, dat uit die wolk tijdens mijn waarneming geen druppel regen viel.” Uit de beschrijving blijkt, dat deze hoos dynamisch niet veel te betekenen had en de grond niet bereikte.
- b. 23° N, 60.5° W, 28 VI 1928¹¹) Een blinde waterhoos, waarvan de wervelachtige storing aan het wateroppervlak zich vertoonde onder een lange dikke cumuluswolk. De breedte van deze wervel was slechts 12 m.
- c. Dorpat, 6 VII 1918¹²). Deze hoos was verbonden aan een wolk, die zich bevond vóór een cumulonimbus met onweer, en wordt beschreven als een geïsoleerde vlakke kleine regen- en onweersvrije cumulus, waarvan de afmeting in verticale richting 500–600 m was. Evenals in geval *a* reikte ook hier de slurf niet tot aan de grond en werd geen grondstoring waargenomen.
- d. Warnemünde, 20 IX 1928¹³). Twee hozen, die de grond niet bereikten, deden zich voor onder aan een geïsoleerde 2 km lange 400–500 m dikke cumulus (opgaven van een zich op dat moment in de lucht bevindende vlieger). Verder nog slechts hier en daar een geïsoleerde cumulus.



Figuur 14

- e. 5.5° Z, 172.5° W, 1 XI 1925¹⁴). Van deze waterhoos werd medegedeeld, dat hij zich aan een cumulus bevond. Hij is de enige van dit vijftal waarvan een slurf tot aan de aarde zichtbaar was. Zelfs kan men op grond van de temperatuur- en vochtigheidsgegevens berekenen (zie 362), dat de drukdaling in de kern van de hoos minstens ongeveer 46 mb moet hebben bedragen, wat op een vrij krachtige hoos wijst.

Conclusie: Gezien het zeer grote aantal waarnemingen (84 %), dat direct of indirect op een verbonden zijn met een cumulonimbus wijst, tegenover het zeer kleine aantal (nog geen 2 %), dat het samenhangen met een cumulonimbus tegenspreekt, waarvan dan alle op één na betrekking hebben op kennelijk zwak ontwikkelde hoosjes, lijkt het niet gewaagd om tot de overigens reeds vroeger aanvaarde opvatting te besluiten, dat *goed ontwikkelde hozen alleen in samenhang met cumulonimbus voorkomen*, terwijl de hoosachtige aanhangsels, die wel eens aan cumuli worden waargenomen, zelden de grond bereiken en in ieder geval van weinig energie blijk geven. Slechts de laatste onder *e* genoemde waarneming is met deze conclusie in strijd, maar waar het hier slechts één waarneming van de 295 geldt mogen we voor dit geval wel een waarnemingsfout onderstellen, in die zin dat een zich juist ontwikkelende cumulonimbus door de waarnemer op zee voor een cumulus is aangezien.

32 De samenhang met een neerslaggebied

Van de 271 met betrekking tot dit punt in aanmerking komende gevallen bleken 208 of 77 % op gelijktijdige neerslag binnen de gezichtskring te wijzen; waar opmerkingen omtrent het karakter gemaakt werden wezen deze meestal op zware buienneerslag. Aanduidingen als stortregen, slagregen, zware hagel, hagelstenen als base-balls, wolkbreuk, komen dan ook veelvuldig voor, vooral in de beschrijvingen van de Amerikaanse tornado's.

Er waren 54 waarnemingen die zich over de neerslag niet uitlieten, terwijl slechts 9 of 3 % het optreden van gelijktijdige neerslag ontkenen. Van deze 9 zijn er dan nog 3 waarbij vermeld wordt dat de neerslag begint te vallen ongeveer op het moment dat de hoos gaat verdwijnen. Tot de overblijvende 6, waarbij dus geen neerslag, noch gelijktijdig noch waarschijnlijk achteraf, zich voordoet, behoren allereerst 3 van de 5 onder cumuli voorkomende hozen, namelijk *a*, *c* en

d (blz. 17), die alle tot de zwak ontwikkelde behoren. Van de overige 3 volgen de bijzonderheden hieronder:

- a. Cattewater, 6 X 1928¹⁵). „Regen zag men niet uit de wolk vallen, ook niet achteraf.” Alles wijst er op, dat deze hoos weinig energie heeft ontwikkeld: een volledige slurf bestond slechts 1 minuut, de storing aan het wateroppervlak slechts 5 minuten.
- β. Zuiderzee, 30 VII 1928¹⁶). „Van neerslag geen sprake, het was meest zonnig.” Volgens de verdere beschrijving daalde de slurf tot vlak boven zee. Een storing aan het wateroppervlak bleek echter niet op te treden.
- γ. Wassenaarse Slag, 22 VII 1940¹⁷). „Tijdens het verschijnsel was er geen sprake van regen.” Na 5 minuten kromp de slurf, die „mogelijk het zeeoppervlak bereikt had” weer in en ging over in een sliervorm waarna oplossing volgde. Uit de beschrijving volgt omtrent de intensiteit van deze hoos niet veel, blijkbaar was de waarnemingsafstand te groot. In ieder geval was de hoos van korte duur.

Op grond van bovenstaand resultaat moet onze conclusie luiden, *dat goed ontwikkelde hozen uitsluitend worden waargenomen aan cumulonimbi waaruit neerslag valt, in verreweg de meeste gevallen gelijktijdig met, een enkele keer onmiddellijk na het optreden van de hoos.*

33 De plaats binnen of buiten het neerslaggebied

Daar het, gezien de enorme opwaartse luchtbeweging (zie 352) bij voorbaat onmogelijk is, dat ter plaatse van een hoos neerslag kan vallen, zij hier volstaan met de mededeling, dat van de 132 beschrijvingen die zich over dit punt uitlieten, 119 (90%) geen twijfel overlaten dat de hoos in kwestie zich inderdaad buiten het neerslaggebied bevond. De overige gevallen, waarin meer of minder duidelijk de indruk gewekt wordt, dat het ter plaatse van de hoos zelf regende, moeten wel aan onnauwkeurig waarnemen worden toegeschreven.

In dit verband zij nog gewezen op het onderzoek van Wegener, gebaseerd op 258 hoosbeschrijvingen en weergegeven in zijn standaardwerk „Wind- und Wasserhosen in Europa”. Wegener vond niet één hoos die in het neerslaggebied voorkwam, wèl verschillende vlak aan de rand er van.

34 Nadere oriëntatie ten opzichte van het neerslaggebied

Betrouwbare waarnemingen hieromtrent zijn bijzonder schaars.

341 Verdelen we het veld onder de bijbehorende cumulonimbus door een rechte lijn loodrecht op de trekrichting door het midden van het neerslaggebied in een voorste en een achterste helft, dan blijkt dat uit de beschrijvingen van 23 hozen kan worden vastgesteld, dat zij zich in de voorste, en van 31 dat zij zich in de achterste helft bevonden. Toen Wegener deze vraag uit zijn in 1917 gehouden onderzoek wilde beantwoorden beschikte hij over nog veel minder gegevens hieromtrent: hij kwam tot de conclusie dat de meeste hozen vóór de neerslag uit schijnen te trekken, maar dat ze ook aan de achterkant kunnen voorkomen. In ieder geval volgt uit beide onderzoekingen, dat indien de hozen er al een voorkeur voor voor of achter op na houden, deze dan toch zeker vrij gering is.

342 Trekken we een lijn door het midden van het neerslaggebied evenwijdig aan de trekrichting, dan blijken we 23 hozen in de rechterhelft en slechts 6 in de linkerhelft te kunnen localiseren. Wegener vond 6 hozen in de rechterhelft tegen 4 in de linker en concludeerde derhalve, dat van een overwegen van de rechtse of de linkse hozen weinig te zeggen was. Daar ons onderzoek echter op een voorkeur voor de rechterhelft schijnt te wijzen en deze, zo hij werkelijk bestaat, iets met de aarddraaiing te maken zou kunnen hebben, ligt het voor de hand de hozen te verdelen naar het halfmond waarop ze voorkwamen en tevens die, welke optraden tussen 25° N en 25° Z buiten te sluiten, teneinde een eventuele invloed van de aardrotatie goed duidelijk tot uiting te doen komen. Het blijkt dan, dat ten noorden van 25° N 18 hozen rechts, 6 links van het neerslagcentrum vermeld worden. Zou nu inderdaad de aarddraaiing hier in het spel zijn, dan zouden de twee ten zuiden van 25° Z waargenomen hozen zich aan de linkerkant van de bijbehorende neerslagcentra moeten hebben bevonden. Het tegengestelde blijkt echter het geval te zijn, waardoor de mogelijkheid van de invloed van de aardrotatie weer twijfelachtig wordt*. De

* Indien men uitgaat van de onderstelling, dat inderdaad door een of ander mechanisme, verband houdende met de aardrotatie, de hozen op het noordelijk halfmond een voorkeur voor rechts en die op het zuidelijk halfmond een voorkeur voor links zouden hebben, dan kan men dus zeggen, dat na uitsluiting van de hozen in de gebieden waar de aarddraaiing weinig of geen invloed heeft, van de 26 gevallen 18 voor de onderstelling gunstig zijn en 8 niet.

De mogelijkheid echter bestaat, dat in werkelijkheid geen voorkeur aan-

door onze statistiek gesuggereerde voorkeur voor de rechterhelft op het noordelijk halfrond moet trouwens met enige voorzichtigheid worden beoordeeld, daar een groot aantal van de beschikbare waarnemingen gedaan is in Nederland tussen 1928 en 1940, in de tijd dat de hozentheorie van Wegener hier veel opgang maakte. Deze theorie eist, zoals we later zullen zien, op het noordelijk halfrond een samengaan van de cyclonale draaiingszin met een positie rechts van het midden van de wolk, en daar inderdaad de meeste hozen cyclonaal draaien was men wel eens wat al te zeer geneigd het bijbehorende neerslagcentrum links te zoeken en aldus de hoos rechts van dit centrum te localiseren.

343 Verder is er nog een vrij groot aantal hozen, namelijk 12*, waarvan kon worden vastgesteld, dat zij zich tussen twee dicht naast of achter elkaar gelegen neerslaggebieden in bevonden. Opmerkelijk is, dat deze hozen over 't algemeen zeer krachtig ontwikkeld waren. We geven slechts enige voorbeelden:

- a. Nashville, Tennessee, U.S.A., 14 III 1933¹⁸). Grote hagelstenen vóór het passeren van de tornado, zware regenval vlak er na. Dat deze tornado bijzonder goed ontwikkeld was blijkt uit het zogenaamde explosie-effect, dat aan honderden gebouwen in het spoor viel waar te nemen. Ook hadden veel mensen nog dagenlang last van pijn in hun oren ten gevolge van de zeer lage druk in het centrum van de tornado.
- b. South Wales, Engeland, 27 X 1913¹⁹). Regen van 17h 20m–17h 30m. De hoos passeerde om 17h 50m, onmiddellijk hierna trad slagregen in. Deze hoos was buitengewoon krachtig, veroorzaakte zeer veel schade en duurde 2.8 uur.

wezig is en alleen het toeval de verdeling 18, 8 (in plaats van 13, 13, wat dan het meest waarschijnlijk zou zijn geweest) heeft tot stand gebracht. Een berekening leert, dat de kans, dat alleen het toeval een afwijking 18, 8 of groter veroorzaakt, gelijk is aan 7,8 %. Neemt men, zoals veelal gebruikelijk, als betrouwbaarheidsdrempel een overschrijdingskans van 5 % aan, dan mag de afwijking van de gevonden verdeling (18, 8) ten opzichte van de verdeling 13, 13 aan het toeval worden toegeschreven en kan men op grond van *deze* gegevens dus niet tot de juistheid van de onderstelling besluiten.

* Dit aantal lijkt misschien niet zo groot; men moet echter bedenken, dat men uit de beschrijvingen slechts bij uitzondering iets omtrent de neerslagverdeling in de omtrek van de hoos kan achterhalen.

- c. Georgia, U.S.A., 7 IV 1938²⁰). We citeren de beschrijving van een vrouw, die zich bevond in een huis waar de tornado overheen trok: „ het was aardedonker en het bliksemde onophoudelijk, terwijl de regen in stromen viel. Daarna trad voor korte tijd een plotselinge absolute stilte in gedurende welke geen druppel regen viel, toen (volgt een beschrijving van het woeden van de tornado ter plaatse) daarna kwam er een tweede volkomen windstilte zonder enig geluid, die een sterke druk op ons moreel uitoefende, en toen kwamen plotseling de stromen regen door het dak die ons bijna verdronken.”

Ook Wegener geeft in zijn boek een zestal voorbeelden van hozen die op de grens van twee buien ontstaan, terwijl Humphreys deze situaties voor tornado's zelfs karakteristiek schijnt te vinden (zonder er overigens aandacht aan te besteden). Immers waar hij in zijn artikel „The tornado”²¹) een bespreking geeft van de verschijnselen die zich bij het optreden van een normale tornado voordoen, zegt hij omtrent de neerslag:

„Regen en gewoonlijk hagel 10 à 30 minuten van te voren, licht neerslag op het ogenblik van de tornado (slurf dikwijls duidelijk waargenomen en soms gefotografeerd) en een zondvloed van regen, soms vermengd met hagel, kort daarna.”

Ten aanzien van de oriëntatie van de hoos ten opzichte van het bijbehorend neerslaggebied kunnen we ons resultaat als volgt samenvatten:

1. Geen duidelijke voorkeur voor voor- of achterkant.
2. Geen zekere voorkeur voor rechter- of linkerkant.
3. Veelal krachtig ontwikkelde hozen tussen dicht naast of achter elkaar gelegen neerslaggebieden.

35 Het bewegingsveld

Daar hiervan geen volledige waarnemingen beschikbaar zijn zullen van hier af aan de directe waarnemingsresultaten af en toe door bepaalde overwegingen moeten worden aangevuld.

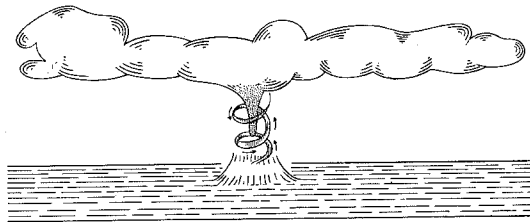
351 DE HORIZONTALE BEWEGING

3511 *De rotatie.* Van 295 waarnemingen maakten 130 melding van een draaiende beweging om de lengteas, 164 lieten zich over een draaiing niet uit terwijl slechts 1 waarnemer meedeelde, dat van een draaiing

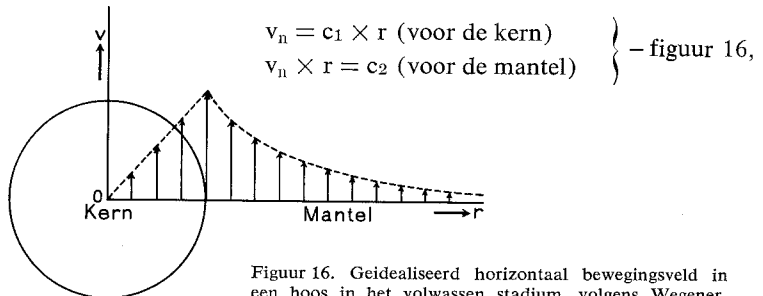
niets te zien was. Het betreft hier de reeds op blz. 19 genoemde hoos over de Zuiderzee. De betrokken passage uit de beschrijving luidt: „Een bepaalde rotatie werd in de slurf niet waargenomen.”

Tegenover het overweldigend grote aantal hozen, waarvan de draaiing wél werd vermeld, lijkt het niet voorbarig, om, evenals vrijwel alle onderzoekers van de laatste 100 jaren, te besluiten, dat alle hozen roteren. Dat in vele gevallen vooral op enige afstand de draaiing niet wordt waargenomen, kan gerust worden toegeschreven aan het gladde uiterlijk, dat de condensatieslurf veelal kenmerkt. Dat deze hozen niettemin snel draaien blijkt wel zodra vaste lichamen (bladeren, takken, planken enz.) of water omhoog worden gezogen. Zo geeft, om een voorbeeld te noemen, de waarnemer van een hoos op de Stille Oceaan²²⁾ door middel van een tekening – figuur 15 – aan, hoe het opgezogen water om de hoos heen naar boven wordt gevoerd. Deze schets geeft een indruk van het bewegingsveld om een hoos. Een andere waarnemer²³⁾, die met zijn schip vlak langs een waterhoos gaat, beschrijft de beweging van het opgezogen water als „als kurketrekkers uit de zee in spiralen opstijgend, rondom een kolom die recht uit de rand van de wolk naar beneden daalde”. In de beschrijving van een hoos op het Zuger Meer wordt vermeld: „Duidelijk zag Roth, hoe het water in draaiende wervels opsteeg” . . . „De waterhoos heeft tot het laatste ogenblik gedraaid”²⁴⁾. Andere beschrijvingen sluiten zich hierbij aan. Onmiskenbare blijken van rotatie geeft ook het relaas van een schooljuffrouw in de U.S.A., die met de hele klas door een tornado werd opgezogen en beschrijft hoe zij en de kinderen in cirkels om de as van de tornado heen vlogen alvorens het bewustzijn te verliezen. Ook de storing, die een waterhoos aan het zeeoppervlak meedeelt, wordt door waarnemers die dicht genoeg bij zijn onveranderlijk als een wervel beschreven. Zo leest men in het verslag van een bij Helgoland opgetreden hoos: „Aan het wateroppervlak vormde de hoos een voet, een zich in sterke wervelbeweging bevindende massa fijne waterdruppeltjes”²⁵⁾. Dit voorbeeld is gemakkelijk met tientallen van gelijke strekking aan te vullen.

Figuur 15. Spiraalsgewijs opzuigen van het water om een hoos. De wolk is een fantasieproduct van de tekenaar.
(Naar een tekening in de *Marine Observer*.)



Ter beantwoording van de vraag, hoe de bij de draaiende beweging behorende lineaire snelheid v_n (voortaan de normale snelheid genoemd) afhangt van de bijbehorende afstand r tot de as, kan men uit de waarnemingen slechts ruwweg afleiden, dat v_n naar binnen toeneemt, althans tot op een geringe afstand van de as. Hier ergens moet v_n een maximum waarde bereiken, daar hij in de as weer gelijk nul moet zijn. Aan deze eis kwam Wegener²⁴) tegemoet door te onderstellen, dat een hoos is opgebouwd uit twee delen. Het binnenste is de „kern”, die star draait, dus volgens $\omega = \text{constant}$, of $v_n = \text{constant} \times r$. Deze rotatie komt, aldus Wegener, door mechanische oorzaken boven in de wolk tot stand en wordt door middel van de inwendige wrijving van de lucht aan de lager gelegen luchtdeeltjes meegedeeld, waardoor de kern zich naar beneden verlengt. Hierna volgt een stadium (het „jeugd stadium”) waarin de kern wel is waar gevormd is maar waarin de lucht om deze kern heen nog nauwelijks in beweging is; de kern wordt dan begrensd door een zeer dunne overgangzone waarin v_n zeer snel naar buiten afneemt. Door de turbulentie wordt allengs deze „mantel” van meegesleepte lucht dikker, en daar de turbulente uitwisseling ten slotte onder constant impulsmoment* moet geschieden streeft de beweging in deze mantel naar een potentiaalstroming. De horizontaal roterende beweging is dan dus gekarakteriseerd door



Figuur 16. Geidealiseerd horizontaal bewegingsveld in een hoos in het volwassen stadium, volgens Wegener.

waarin c_1 en c_2 constanten zijn. De overgang is scherp, daar volgens Wegener de stroming in de kern niet turbulent is. Tegen dit alles zijn bezwaren in te brengen, die onder meer verband houden met de met bovenstaande redenering samenhangende ontstaanstheorie van Wege-

* Het impulsmoment van een bewegend massapunt ten opzichte van een punt is het product van de massa, de normale snelheid van het bewegende punt ten opzichte van het andere punt, en de afstand tussen de twee punten (de voerstraal).

ner, doch het beeld voldoet toch in zoverre, dat de wind tot dicht bij de as toe- en vervolgens weer afneemt.

3512 *De zin van de rotatie.* Het aantal gegevens hieromtrent is klein, mede omdat een vrij groot aantal wegens dubbelzinnigheid niet kon worden gebruikt. Waarnemingen namelijk, die zonder meer spreken van rechtsdraaiend, draaiend met de wijzers van de klok enz. zijn waardeloos indien niet tevens vermeld wordt van welke kant men zich daarbij moet voorstellen de hoos te zien, van boven of van onder. Dergelijke opgaven zijn voor dit onderzoek zekerheidshalve buitengesloten. Hierna bleven 68 waarnemingen over waarvan 48 een cyclonale en 20 een anti-cyclonale draaiingszin gaven. Dit wijst op een duidelijke voorkeur voor cyclonale draaiing, daar het toeval in slechts 1 van de duizend gevallen een dergelijke of grotere afwijking van de fifty-fifty verdeling blijkt teweeg te kunnen brengen. Teneinde de invloed van de aardrotatie nog duidelijker tot uiting te doen komen werd tevens een verdeling naar de breedte gemaakt, met volgend resultaat:

breedte	> 25° N		0°—25° N		0°—25° Z		> 25° Z	
	cycl.	anti-cycl.	cycl.	anti-cycl.	cycl.	anti-cycl.	cycl.	anti-cycl.
aantal	38	12	6	5	1	2	3	1

We zien hieruit, dat het overwegen van de cyclonale draaiingszin nog beter uitkomt als we de waarnemingen op lage breedte buiten beschouwing laten, wat een bevestiging is voor de onderstelling dat dit overwegen aan de aardedraaiing moet worden toegeschreven. Trouwens, ook Wegener vond bij zijn Europese hozen 18 cyclonaal tegen 7 anti-cyclonaal draaiende hozen, terwijl volgens Finley van de Amerikaanse nado's zelfs 95 % cyclonaal roteert. Merkwaardig is, dat de anti-cyclonaal draaiende hozen niet alleen zeldzamer, maar in het algemeen ook zwakker schijnen te zijn en een kortere levensduur hebben dan de cyclonaal draaiende. In overeenstemming hiermee is de zeer grote frequentie van de cyclonale draaiingszin bij de Amerikaanse tornado's, die immers gemiddeld veel krachtiger zijn en langer voortduren dan de elders voorkomende hozen.

De bewering van Wegener²⁶⁾, volgens welke de anti-cyclonale draaiingszin vaker voorkomt bij water- dan bij landhozen, kon niet worden bevestigd: Buiten de tropen draaiden van de 33 landhozen 9 of 27 % anti-cyclonaal, van de 19 waterhozen 4 of 21 %, dus zelfs een nog iets kleiner gedeelte. Gezien het gering aantal waarnemingen waar deze percentages op berusten, kan men slechts zeggen, dat van een voorkeur van de anti-cyclonale draaiing voor land- of zeeoppervlakten weinig te merken is.

3513 *De convergentie* langs het aardoppervlak. Uit de bestudering van de sporen door hozen aan de grond achtergelaten blijkt vaak zeer duidelijk, dat de stroming in de voet van de hoos, behalve een draaiende, ook een naar de as van de hoos gerichte beweging vertoont. Men zie hiertoe bijvoorbeeld de sprekende kaartjes met valrichtingen van bomen in het boek van Wegener²⁴). Ook het spoor van de zware hoos over de Veluwe in 1950²⁷) laat weinig twijfel omtrent de convergentie toe. Over het algemeen is uit het spoor van de meeste hozen de toestromende beweging zelfs duidelijker af te lezen dan de draaiende. De convergentie komt ook vaak tot uiting in de beschrijvingen van waarnemers van waterhozen, die vaststellen, dat het verloop van de golven rondom de voet van de hoos op een draaiende en tegelijk naar binnen gerichte luchtbeweging wijst²⁸). De convergerende luchtbeweging langs het aardoppervlak is in overeenstemming met de aanstonds te behandelen stijgende luchtbeweging in de hoos.

Een belangrijke oorzaak van de convergentie is de door het aardoppervlak op de langs strijkende lucht uitgeoefende wrijving*.

3514 Volledigheidshalve vermelden we de *translatie*, dit is de beweging die alle deeltjes nog buiten de draaiende en de toestromende meemaken in verband met de voorwaartse beweging van het systeem als geheel. De translatiesnelheid kan zeer uiteenlopen, al naar de snelheid van de bijbehorende cumulonimbus. Soms is hij bijna gelijk nul.

3515 *De horizontale snelheden*. Deze zijn groter dan in enige andere atmosferische storing. Daar van de onderzochte hozen niet één recht over een anemometer heen ging, zijn de maximale windsnelheden wellicht in de meeste gevallen nog groter dan de geregistreerde, waarvan we hier enige voorbeelden noemen:

55 m/sec (geen positie aangegeven) (Vlieland, 5 XI 1948)

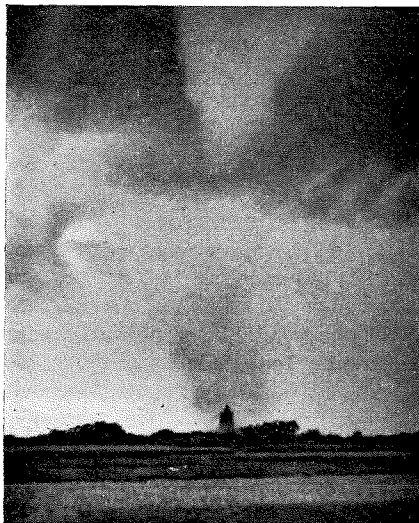
* De werking hiervan kan men zich in't kort aldus voorstellen. Op enige hoogte boven het aardoppervlak werken op een om de as van de wervel draaiend luchtdeeltje in eerste benadering twee horizontale krachten: de middelpuntvliedende kracht en de naar binnen gerichte gradiëntkracht, welke laatste voortvloeit uit het horizontale luchtdrukverval (zie 36). Gaan we uit van een wervel, waarin deze krachten op deze hoogte in evenwicht zijn, zodat een luchtdeeltje hier tijdens zijn draaiing een constante afstand tot de as bewaart, dan zal een dergelijk evenwicht zich *niet* voordoen bij deeltjes, die zich langs het aardoppervlak bewegen. Hier is immers door de wrijving de draaisnelheid en daarmee de middelpuntvliedende kracht kleiner, zodat de deeltjes zich als gevolg van de grotere, naar binnen gerichte gradiëntkracht in de richting van het midden bewegen.

45 m/sec „aan de rand van het spoor”	(Andere in Europa opgetreden hozen)
29 m/sec „op 120 m buiten de rand”	
45 m/sec „op geringe afstand van de kern”	(Amerikaanse tornado's)
43 m/sec „op 1200 m afstand van de kern”	
42 m/sec „dicht buiten de rand”	
49 m/sec (geen positie aangegeven)	

De Amerikaanse ingenieur J. D. Marshall berekende de windsnelheid die bij de tornado in Kansas, 4 VII 1932 tenminste opgetreden moest zijn om een stalen waterleidingbuis om te blazen, op 74,5 m/sec. Van Everdingen²⁹⁾ schatte de windsnelheden bij de hozen van Borculo op 10 VIII 1925 op groter dan 50 m/sec, dit op grond van zekere verwoestingen, door de hoos aangericht. Door middel van dergelijke berekeningen kwam Wegener tot een gemiddelde maximale windsnelheid van ca 50 m/sec, bij zeer zware hozen ca 80 m/sec. Humphreys²⁾ schat de windsnelheden in tornado's heel wat hoger, namelijk van 45-225 m/sec.

352 DE VERTICALE BEWEGING

Uit de sterke toestroming van de lucht langs het aardoppervlak in de richting van de hoos volgt al, dat de verticale beweging in en om een hoos in hoofdzaak naar boven gericht is. Inderdaad maken talloze waarnemingen melding van naar boven gezogen, soms zeer zware voorwerpen, als takken, planken, gedeelten van huizen. Op de foto's van figuren 5 en 17 geven opgezogen zand, papier, bladeren en dergelijke een duidelijke indruk van de opstijgende beweging, evenals op de hier niet weergegeven foto's van de hoos van Peshawar in 1933³⁰⁾. Bij waterhozen ziet men vaak het opgezogen water in of langs de hoos omhoogschieten. Zo leest men omtrent de hoos op het Zuger Meer²⁴⁾: . . . „terwijl men duidelijk zag, hoe het water in de hoogte werd getrokken, hoe het opwaarts wervelde”. Indien de condensatie zelf een voor het oog zichtbare structuur vertoont (wat lang niet altijd het geval is) kan men in vele gevallen de opwaartse beweging hieraan waarnemen. Zo wordt in de beschrijving van bovengenoemde hoos van Peshawar vermeld: „De tegen de wijzers van de klok draaiende opwaartse beweging was duidelijk zichtbaar, en het opstijgen van de lucht in de wolkenbasis scheen verbazingwekkend snel in zijn werk te gaan.” Ook de hozen, bij grote branden ontstaan, geven blijk van een opwaartse stroming (zie blz. 14), evenals, in mindere mate, zand- en stofhozen. Hetzelfde kenmerk vertoonden tenslotte de kunstmatige



Figuur 17. Hoos nabij Ouwkerk (Duiveland), 21 VIII 1933. Onder de hoos is een wolk van zand, papier en dergelijke zichtbaar. Als een van de verrichtingen van deze hoos wordt het over een 5 m hoge dijk tillen van een roeiboot genoemd.

Foto Dahmen, Utrecht.

hoosjes van Vettin, Weyer en Letzmann, zoals door middel van ballonnetjes en sondes werd aangetoond.

Omtrent de vraag, of in het binnenste van een hoos ook nog een neerwaartse stroming aanwezig is, zijn de meningen verdeeld. Wegener was van opvatting, dat de opwaartse snelheid een maximum bereikt in een cylinderwand om de as van de hoos, terwijl meer naar binnen deze snelheid afneemt en langs de as zelfs in een neerwaartse overgaat. Deze mening grondde hij voornamelijk op de soms bij hozen vastgestelde „holte” langs de as, waardoor de hoos de gedaante krijgt van een buis. Van de 295 door ons onderzochte beschrijvingen werd in 19 deze holte inderdaad vermeld, 264 zwegens hierover, terwijl 12 duidelijk lieten uitkomen dat geen holte te zien was. Het althans incidenteel voorkomen van een holte kan men dus niet ontkennen, vooral daar sommige beschrijvingen op dit punt wel bijzonder overtuigend zijn. Als voorbeeld geven we er een van een Amerikaanse boer, die door een langzaam over zich heen trekkende tornado in de gelegenheid gesteld werd zijn binnenste te bekijken: „ . . . ik zag recht omhoog in het hart van de tornado. Er was een ronde opening in het midden van de slurf, ongeveer 50 of 100 voet in diameter, en deze opening strekte zich recht naar boven uit over een afstand van ten minste een



Figuur 18. Opname van de voet van een waterhoos met „holle” kern.

British Crown Copyright reserved.

halve mijl. De wanden van dit gat werden gevormd door ronddraaiende wolken en het geheel werd schitterend verlicht door bliksemstralen, die zonder ophouden zigzaggewijze van de ene kant naar de andere sloegen³¹⁾. De holte is ook meermalen gefotografeerd – zie als voorbeeld figuur 18.

Dat althans soms zo'n holte zich voordoet is dus in ieder geval zeker. Wegener nam aan dat de holte er altijd is, terwijl hij het geringe aantal waarnemingen er van toeschreef aan het feit, dat te sterke condensatie om de holte heen deze aan het oog onttrok. Uit deze condensatievrije kern concludeerde hij vervolgens tot adiabatische* verwarming, dus tot een naar beneden gerichte stroming langs de as. Hiertegen bestaan ernstige bezwaren, allereerst al omdat de holte bij de experimentele hozen van Weyer, Dines en Letzmann eveneens optrad, waar geen adiabatische verwarming bij in het spel kon zijn. Trouwens, het is algemeen bekend, dat ook zandhozen vaak duidelijk hol zijn! Veel meer voor de hand ligt dan ook de door velen voorgestane uniforme verklaring van al deze bij luchtwervels optredende holten door middel van de middelpuntvliedende kracht (zie 4513). Het voorkomen van een holle kern is dus niet het geschikte argument om het bestaan van een neerwaartse stroming binnen in de hoos te verdedigen.

Daarentegen leiden de soms gedane waarnemingen van in de kern van waterhozen opgezogen water tot de vaststelling, dat althans in deze gevallen van een neerwaartse stroming geen sprake was: „Er was een heldere scherp begrensde holle ruimte, als de ziel van een kanon, ongeveer 50 cm in doorsnee, met zeer gladde grenzen. Hierbinnen had het water een snelle omhoogspiralende beweging en zag er uit als donkere rook³⁾. „Men kon nu zeer goed opmerken, dat het zee-water langs het midden van dit kanaal omhoog ging³⁾).

Kan men een neergaande luchtbeving in het midden dan afleiden uit waarnemingen van verticale verplaatsingen van flarden en dergelijke in de condensatie? Wanneer deze onregelmatigheden zich voordeden, vermeldden de waarnemers meestal een opwaartse beweging zonder meer. Slechts in 8 beschrijvingen werd aangegeven welke beweging in 't bijzonder binnen in de kern werd waargenomen. Hiervan gewaagden 6 van een opwaartse beweging en 2 van een neerwaartse. Van deze laatsten maakten beide bovendien melding van een stijgende beweging aan de buitenkant van de slurf. Dat het aantal waarnemers

* Een luchtdeeltje ondergaat een adiabatisch proces, als tijdens dat proces geen warmte van buiten wordt opgenomen of naar buiten wordt afgestaan.

van bewegingen in de kern zo klein is hangt samen met het volkomen gebrek aan zichtbare structuur dat de condensatie dikwijls kenmerkt, alsmede met het feit, dat het binnenste van de slurf minder goed is waar te nemen dan de buitenkant. Overigens moet men voorzichtig zijn met de interpretatie van bewegingen van onregelmatigheden in de slurf. Deze zijn namelijk, daar het condensatieproces steeds door- gaat, geenszins kenmerkend voor de luchtbeweging ter plaatse.

Men kan ook trachten, uit de vervorming van het wateroppervlak onder waterhozen gevolgtrekkingen omtrent de verticale beweging te maken. De meeste waarnemers spreken niet over verheffing of verdieping van het wateroppervlak, doch melden slechts dat de golven in de hoosvoet van een tegelijk draaiende en toestromende luchtbe- weging blijk geven. Waarnemers, die dicht genoeg bij zijn, melden echter vaak wèl aanzienlijke hoogteveranderingen van de waterspiegel in en om de hoosvoet. In een deel van deze gevallen neemt men een verheffing waar. Voorbeelden: „De zee binnen deze cirkel (onder de hoos) was bol, met brekende golven aan de omtrek”³²⁾. „. . . het water, dat opgestuwd werd tot een heuvel van 1.5 à 3 m hoogte en 20 m doorsnee . . .” Deze waarneming werd van 60 m afstand ge- daan³³⁾. „De storing had een heuvel van water doen verrijzen van ongeveer 60 cm hoog”³³⁾. „Een massieve kegel van water verrees tot een hoogte van ongeveer 5 m in het midden van de opwervelende drup- pels”³⁴⁾. Dergelijke waarnemingen van een verheffing van het water- oppervlak onder een hoos zijn volgens de kenner van waterhozen Hurd³⁾ in de meerderheid tegenover die van een verdieping, waar- van we een drietal voorbeelden ontlene aan het boek van Wegener: „De voet van de hoos scheen op een grote bolvormige holle schaal te rusten en hiermee verder te glijden . . . Om de rand van de schaal kookte de zee heftig omhoog”. „Men hoorde zeer duidelijk het geruis van de lucht, die, vanuit het bovenste deel van de hoos loodrecht naar beneden vallend, met geweld op het water sloeg, het dwong zich uit te hollen, en om de holte heen een schuimgordijn van verscheidene voeten hoog optrok”. „Toen verhief zich het water, terwijl aan de omtrek van een cirkel van ongeveer 50 schreden doorsnee kammen en stralen van water en schuim omhoogsprongen. Het verschijnsel leek op een draaiende kroon”.

In Franklin's „Philosophical Papers” wordt mededeling gedaan van de waarnemingen van een waterhoos, die onder zeer gunstige omstandig- heden van nabij geobserveerd kon worden. „De hoos trok langzaam voorbij het schip”, vertelt de ooggetuige. „Ik kon duidelijk waarnemen

dat uit de hoos een hevige luchtstroom voortkwam, die een holte van ongeveer zes voet middellijn in het wateroppervlak maakte en het water in een ronde, ongelijkmatige ring om de holte heen verhieft". Figuur 18, maar vooral een hier niet gereproduceerde zeer suggestieve aquarel³⁵) van de voet van een kleine blinde waterhoos geeft een zich bij deze beschrijvingen aansluitende vervorming van het wateroppervlak te zien.

Dat althans onder zekere omstandigheden het wateroppervlak onder de kern van een waterhoos wordt uitgehold is uit het voorgaande wel duidelijk; helaas kan men dit verschijnsel op tweeërlei wijze opvatten. Men kan het inderdaad toeschrijven aan een dalende stroming in het binnenste van de hoos, welke stroming aan het wateroppervlak dan in een divergerende overgaat. De kroonvormige verheffing om de holte heen stelt dan de zone voor, waar de van binnen uit divergerende en de van buiten convergerende luchtbeweging elkaar ontmoeten. Maar ook een verklaring door middel van de middelpuntvliedende kracht lijkt mogelijk, op dezelfde wijze als in 4513 voor de holte in de condensatieslurf gegeven zal worden. Deze verklaring zou dan voor dit geval in 't kort hier op neer komen, dat de druppels, kammen of stralen, die naar de beschrijvingen van vele waarnemers door de hevige luchtbeweging uit het bovenste laagje van het water min of meer worden losgemaakt, onmiddellijk gaan meedraaien, door de middelpuntvliedende kracht zich – niettegenstaande de toestromende component van de luchtbeweging – op enige afstand van het kernpunt verzamelen en zodoende de in de beschrijvingen bedoelde draaiende kroon vormen, binnen hetwelk het wateroppervlak dan natuurlijk hol schijnt.

Tenslotte kan men pogen het bestaan van een dalende tegenstroming binnen in hozen aannemelijk te maken, door te wijzen op een overeenkomstig verschijnsel bij andere wervels, namelijk enerzijds bij de experimentele hozen van Vettin, Weyer en Letzmann, anderzijds bij tropische cyclonen. Voor de stroming in de hoosjes van Vettin zie figuur 10 rechts. Ook die van Weyer en Letzmann vertoonden onder bepaalde omstandigheden een smalle neerwaartse tegenstroming te midden van de krachtige opwaartse stroming. De naar beneden gerichte luchtbeweging in het oog van een tropische cycloon is een algemeen erkend feit.

Natuurlijk mag men aan dergelijke analogieën geen bewijskracht toekennen. De stroming in en om de kunsthozen van Weyer en Letzmann is mede van de eigenschappen van de ventilator afhankelijk. Deze bestaat uit verticaal staande schoepen die de lucht opzij werpen, inge-

plant in een naaf, die hieraan niet meedoet, en waaronder zich daarom, vooral als hij groot is ten opzichte van de schoepen, gemakkelijk een dalende compensatiestroming zal kunnen vormen. Met betrekking tot de inderdaad op sommige punten bestaande verwantschap tussen een hoos en een tropische cycloon dient men te bedenken, dat men de bijzonderheden in het bewegingsveld van de ene niet zonder meer op dat van de andere van toepassing mag verklaren, gezien de totaal ongelijksoortige afmetingen. Een tropische cycloon heeft gemiddeld een ongeveer 5000 maal zo grote diameter als een hoos! Men kan een cycloon met een dunne platte schijf, een hoos met een lange buis vergelijken.

Valt aan het bestaan van een meest zeer krachtige opwaartse stroming niet te twifelen, omtrent een neerwaartse kan men, gelet op het voorgaande, hoogstens zeggen, dat door de verschijnselen de mogelijkheid wordt opengelaten dat hij in sommige gevallen in een beperkt gebied langs de as aanwezig is. Nauwkeurige waarnemingen hieromtrent zijn zeer gewenst (maar moeilijk!).

36 Het horizontale drukveld

Teneinde enig idee te krijgen van de drukvermindering in het centrum van een hoos ten opzichte van de omgeving buiten de hoos, beschikken we buiten enige rechtstreekse waarnemingen over indirecte methodes, waarvan we als eerste noemen:

361 De methode van Wegener, gegrond op de door hem onderstelde snelheidsverdeling (zie blz. 24). De werkwijze komt op het volgende neer:

De bewegingsvergelijking voor een eenparige horizontale cirkelbeweging van een luchtdeeltje luidt, onder verwaarlozing van wrijving:

$$\frac{v^2}{r} + fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = 0$$

v = lineaire snelheid van het luchtdeeltje, positief gerekend voor linksom draaiende beweging (van boven gezien).

$f = 2 \Omega \sin \varphi$

Ω = hoeksnelheid van de aardrotatie.

φ = geographische breedte, positief voor noorderbreedte.

r = afstand tot het middelpunt van de beschreven cirkel.

p = luchtdruk.

ρ = luchtdichtheid.

ω = hoeksnelheid van het deeltje.

De vergelijking geeft aan, dat de som van de op het luchtdeeltje werkende krachten (middelpuntvliedende kracht, Corioliskracht en gradientkracht) gelijk nul is. (Positief zijn van een term geeft aan, dat de overeenkomstige kracht naar buiten werkt).

De Coriolisterm kunnen we voor ons doel wel verwaarlozen, immers als bij voorbeeld

$v = 50$ m/sec en $r = 50$ m, dan is $v\omega \approx 10^{-4} \cdot 50 \approx \frac{1}{200}$ m/sec², terwijl

$$\frac{v^2}{r} = 50 \text{ m/sec}^2. \text{ We houden dan over } \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\rho v^2}{r}$$

Substitutie van $v = \omega \times r$ levert $\boxed{dp = \rho r \omega^2 dr}$ (I)

Om het drukverschil tussen het middelpunt van een hoos en de omgeving op grote afstand te vinden moet deze differentiaalvergelijking in twee etappes geïntegreerd worden :

a Voor de star draaiende „kern” is ω onafhankelijk van r . Integratie van (I) van het middelpunt tot de rand van de „kern” levert derhalve $\Delta p_{\text{kern}} = \frac{1}{2} \rho \omega_0^2 r_0^2 = \frac{1}{2} \rho v_0^2$ (de index 0 duidt aan, dat de beschouwde grootte op de rand van de kern betrekking heeft.)

b Voor de volledig ontwikkelde „mantel” is ω niet constant, daar hier een potentiaalstroming wordt ondersteld : $v \times r = c_2$.

c_2 wordt gevonden uit de voorwaarde, dat v aan de grens tussen „kern” en „mantel” geen sprong maakt :

$v_0 = \omega_0 \times r_0$ } waaruit $c_2 = \omega_0 r_0^2$. De vergelijking voor de beweging in de „mantel” gaat dus over in

$v \times r = \omega_0 r_0^2$ of $\omega (= \frac{v}{r}) = \omega_0 \frac{r_0^2}{r^2}$. Dit gesubstitueerd in (I) geeft

$dp = \rho \omega_0^2 r_0^4 \frac{dr}{r^3}$. Voor het drukverschil tussen de rand van de

„kern” en de omgeving op grote afstand vindt men dan

$$\Delta p_{\text{mantel}} = \frac{1}{2} \rho \omega_0^2 r_0^2 = \frac{1}{2} \rho v_0^2.$$

Blijkbaar zijn de bijdragen tot de drukvermindering in de „kern” en in de „mantel” even groot. In de termen van Wegener: In het „jeugd-stadium” (waarin de hoos nog slechts uit de star draaiende „kern”

bestaat) is $\Delta p = \frac{1}{2} \rho v_0^2$, in het „volwassen stadium” (waarin ook de „mantel” volledig ontwikkeld is) het dubbele daarvan. Wegener construeerde voor beide fasen een kromme die Δp geeft als functie van v_0 . Voor het volwassen stadium geeft bij voorbeeld

$$v_0 = 50 \text{ m/sec een } \Delta p = \text{ca } 30 \text{ mb en}$$

$$v_0 = 100 \text{ m/sec een } \Delta p = \text{ca } 120 \text{ mb.}$$

Ondanks de toegepaste vereenvoudigde onderstellingen (eenparige cirkelbeweging, splitsing in starre kern en potentiaanstroming, ρ constant) zal de gevonden betrekking waarschijnlijk een vrij goed idee geven van de grootte-orde van de drukverschillen tussen het centrum van een hoos en de omgeving.

362 De tweede indirecte methode, eveneens van Wegener afkomstig, is gebaseerd op het feit, dat de zichtbare slurf ontstaat doordat de (bij benadering) adiabatisch langs het aardoppervlak aangezogen vochtige lucht door de sterke drukdaling afkoelt en condenseert. Kent men de vochtigheidstoestand van deze aangezogen lucht, en vertoont de beschouwde hoos inderdaad deze condensatie, dan kan men hieruit de druk in de wand van de condensatieslurf berekenen. Hiertoe kan men gebruik maken van een thermo-dynamisch diagram, dat de condensatiedruk geeft als functie van de uitgangswaarden van druk, temperatuur en vochtigheid van de aangezogen lucht. Een groot bezwaar van deze werkwijze is, dat de vochtigheidstoestand langs het aardoppervlak rondom een hoos vaak plaatselijke verschillen vertoont, juist omdat, zoals we zagen, een hoos meestal voorkomt dicht buiten de rand van een neerslaggebied. Door ons werd de methode dan ook alleen toegepast voor die gevallen, waarin de hoos hetzij ver van het neerslaggebied was verwijderd, hetzij al optrad voordat de neerslag begon te vallen. De resultaten zijn de volgende drukverschillen tussen het oppervlak van de condensatieslurf en de omgeving, ter hoogte van het aardoppervlak:

Cottage City, Mass. U.S.A., 19 VIII 1896 ³⁶⁾	97 mb
5.5° Z, 172.5° W, 1 XI 1925 ¹⁴⁾	64 mb
Littleton, N-H, U.S.A., 9 VII 1931 ³⁷⁾	28 mb
Straat Malakka, 5 IV 1931 ³⁸⁾	49 mb
Singapore, 11 VI 1924 ³⁹⁾	56 mb

In twee gevallen stonden geen rechtstreekse vochtigheidsgegevens ter beschikking, maar was wel de basishoogte van de bijbehorende cumu-

Ionimbus bekend, terwijl bovendien kon worden aangenomen (door de afwezigheid van tegelijkertijd in de nabijheid vallende neerslag), dat de vochtigheidstoestand langs de aardoppervlakte vrij homogeen was. In zo'n geval zal de druk in de rand van de condensatiezuil ongeveer gelijk zijn aan die in de wolkenbasis. De op deze wijze gevonden drukverschillen bedroegen bij de waterhozen van:

Meer van Genève, 9 VIII 1945⁴⁰) ca 110 mb (wolkenbasishoogte 950 m)
Thiessow, Rügen, 29 VIII 1937⁴¹) ca 55 mb (wolkenbasishoogte 490 m)

Alle bovengenoemde hozen waren krachtig ontwikkeld. Men dient te bedenken, dat deze met behulp van vochtigheidsgegevens berekende drukverschillen met de omgeving slechts betrekking hebben op de buitenkant van de condensatieslurf; in het centrum moet de druk dus nog lager zijn.

363 Rechtstreekse luchtdrukwaarnemingen. De merkwaardigste hieronder is die van twee waarnemers in Minnesota, U.S.A.⁴²), die tijdens de passage van het centrum van een tornado de aneroïde waarnamen, waarvan de wijzer naar beneden bleek te wijzen. De aanwijzing bleek met een druk van 785 mb te moeten zijn overeengekomen, wat 197 mb lager was dan de druk buiten de tornado. Een andere waarnemer, in St Louis, Missouri, U.S.A.⁴³) las tijdens het overtrekken van de kern van een tornado eveneens de aneroïde af. Na zorgvuldige herijking bleek de afgelezen hoogte met een druk van 912 mb (zeeniveau) te moeten zijn overeengekomen, met een maximaal mogelijke fout van 6.7 mb. Tenslotte is er de waarneming van een hoos in Tunis⁴⁴), die op de waarnemingsplaats een drukdaling van 45 mb veroorzaakte. Op welke afstand deze hoos de waarnemingsplaats passeerde werd niet vermeld.

De overige waarnemingen geven in ieder geval slechts de drukdaling op enige afstand van het centrum:

- a. Ter hoogte van Kaap Mendocino, 21 III 1914³). Bij het voorbijtrekken van de hoos (afstand niet vermeld) ontstond een drukdaling van 18.3 mb.
- b. Minnesota, U.S.A., 20 VII 1951⁴⁵). Volgens het barogram – figuur 37 – daalde de druk plotseling 11.5 mb en steeg daarna weer 16 mb. Deze tornado was krachtig ontwikkeld en ging op ca 600 m afstand voorbij.
- c. Tennessee, U.S.A., 20 III 1952⁴⁶). Het midden van de hoos trok voorbij op 37 m afstand, de drukstoring bedroeg 23 mb.

- d. Virginia, U.S.A., 17 XI 1927⁴⁷). De drukstoring op een plaats „dicht bij de rand van de hoos” bedroeg 15.6 mb.
- e. Illinois en Indiana, U.S.A., 18 III 1925⁴⁸). Drukstoring 7 mb, op een afstand van ca 1600 m.
- f. Fidzji eilanden, 21 II 1931⁴⁹). Drukstoring 7 mb, „op enige afstand”.
- g. Bermuda, 12 XII 1925⁵⁰). Drukstoring 7 mb, op 15 m van het centrum.
- h. South Wales, Engeland, 27 X 1913¹⁹). Drukstoring 10 mb, „op enige meters van de rand van de hoos”.

364 Dat de drukdalingen bij het overtrekken van het centrum van een hoos groot kunnen zijn blijkt ook uit het bekende *explosie-effect*, dat hierin bestaat, dat afgesloten ruimten als het ware open barsten. Daken worden opgetild, sterke muren naar buiten geblazen, kelderdeuren opengerukt. Vooral tornado's maken zich hieraan schuldig. Tekenend is in dit verband bijvoorbeeld het volgende citaat uit een tornadobeschrijving:

„Honderden gebouwen toonden door hun opgetilde daken en hun naar buiten geblazen muren de explosie-achtige uitwerking van de tornado Men kon zien, dat muren of daken, die grote ruimten omsloten bijna zonder uitzondering onder de ongewone druk waren bezweken Tientallen personen in het gebied van de tornado konden niet goed horen en leden aan pijn in hun oren gedurende verscheidene dagen, vanwege de plotseling verminderde luchtdruk”⁵¹).

Resumé: De resultaten van de rechtstreekse luchtdrukwaarnemingen lopen sterk uiteen, wat waarschijnlijk moet worden toegeschreven aan de hoge mate waarin de druk afhankelijk is van de afstand tot het hooscentrum. In ieder geval volgt echter uit de beide indirecte methodes en de rechtstreekse waarnemingen, dat in de kernen van krachtig ontwikkelde hozen drukverschillen met de omgeving van 50 à 200 mb kunnen voorkomen*.

* Ferrel (1886) geeft op, dat de drukdaling in een tornado volgens waarnemingen (die hij niet noemt) ca 75 mm (100 mb) kan bedragen. Humphreys noemt drukverminderingen van de orde van een tiende atmosfeer.

4 *Ontstaanstheorieën*

41 *Inleiding*

Volledigheidshalve slechts noemen we enige verouderde theorieën, namelijk de *vulkanische theorie*, die een (water)hoos voor de rookzuil van een onderzeese vulkaan aanzag, de *stortregentheorie*, die een hoos opvatte als een plaatselijke, scherp begrensde stortregenval, en de *electriche theorie*, volgens welke een hoos het resultaat is van een sterke aantrekking van een electricch geladen wolk door de aarde, waarbij de hoos dan een continue ontlading mogelijk maakt. Deze theorieën, die eertijds hun aanhang aan onvoldoende kennis van de feiten dankten, zijn reeds lang verlaten en zullen we derhalve laten rusten.

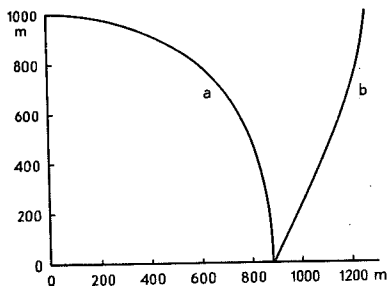
Ook in latere tijden zijn merkwaardige theorieën opgesteld, waaronder we noemen die van Mügge (1927)⁵²), die de aandacht vestigde op dat gebied in de cumulonimbus waar de gevormde hagel door de er onder heersende grote stijgsnelheid van de lucht ongeveer zou blijven zweven. Daar de hagel, steeds kouder, waardoor de cumulonimbus in zich zelf onstabiel wordt. Zodra de stijgwinden verminderen kan de vereffening plaats vinden doordat plaatselijk de koude en dus zware lucht door de er onder gelegen warmere lucht heen breekt in de vorm van een of meer naar beneden zakkende tuiten of slurven. Van de weeromstuit moet de omringende lucht in de onderste lagen naar boven, vandaar de aanzuigende werking van de hoos.

Onafhankelijk van Mügge is onlangs een in hoofdzaak gelijke maar wat verder uitgewerkte theorie opgesteld, en wel

42 *De theorie van Roszmann* (1951)^{53, 54})

Deze houdt in, dat aan het eind van het eerste, nog droge stadium van de cumulonimbus een dichte concentratie van hagel in het binnenste van de wolk de daar aanwezige koude natte lucht in een zeer beperkt gebied tot dalende beweging brengt. Door het temperatuurverschil met de omgevende warmere lucht wordt de daalsnelheid van de koude lucht met afnemende hoogte steeds groter. Tenslotte wordt de lucht door het aardoppervlak in zijn val gestuit en divergeert naar alle zijden.

Het sterkste argument voor de opvatting, dat de verticale beweging in een hoos naar beneden gericht is, is volgens Roszmann gelegen in de stand, die de slurf in de ruimte inneemt. Roszmann berekent namelijk de banen, die door een onder uit de wolk „vallend” deeltje koude natte lucht worden beschreven, indien de lucht onder de wolk alleen een horizontale beweging heeft, waarvan de snelheid evenredig is met de hoogte boven het aardoppervlak. Figuur 19, kromme a geeft een dergelijke baan. In geval van enigszins andere aanvangsvoorwaarden (andere wolkenbasishoogte, andere snelheid onder aan de wolk, ander aanvangs-temperatuurverschil) ontstaan overeenkomstige krommen, die dit gemeenschappelijk hebben, dat zij het aardoppervlak treffen in een punt, dat



Figuur 19. a. Baan van één koud luchtdeeltje, dat uit een 1000 m hoge wolkenbasis zonder beginsnelheid en zonder weerstand verzadigd adiabatisch door de droogadiabatisch opgebouwde lucht onder de wolk „valt”. Begintemperatuur van het deeltje 24° C, temperatuur van de onverzadigde lucht juist onder de wolkenbasis 27° C. Onder de wolk heeft de lucht alleen een horizontale snelheid $v = \frac{\text{hoogte}}{1000} \times 10 \text{ m/sec}$ (naar rechts).

b. De kromme, op welke na elkaar uit de meebewegende wolkenbasis losgelaten deeltjes zich zouden moeten bevinden, op het ogenblik dat het eerste deeltje beneden aankomt.

lijkaars van de top van de kromme ligt, terwijl de kromme naar beneden hol is. De banen echter, die, door een dergelijk horizontaal windveld heen, worden beschreven door warme, van het aardoppervlak *opstijgende* deeltjes, blijken het voetpunt daarentegen loefwaarts van de top te hebben. Uit de vorm van de slurf van een hoos kan men daarom, volgens Roszmann, besluiten of de lucht in een hoos een dalende dan wel een stijgende beweging heeft.

Roszmann toetst nu aan de hand van foto's en beschrijvingen van opgetreden hozen de stand van de slurf aan de door hem berekende krommen, en komt tot de conclusie, dat in 6 van de 7 door hem onderzochte gevallen een dalende luchtbeweging in de hoos heerste.

De fout in de redenering bestaat hierin, dat blijkbaar stilzwijgend wordt aangenomen, dat de baan van één dalend luchtdeeltje samenvalt met de slurf, die de op elkaar volgende deeltjes te zamen te zien zouden moeten geven. Dit zou inderdaad het geval kunnen zijn als de koude natte lucht steeds uit een zelfde niet bewegend punt werd losgelaten; in werkelijkheid echter beweegt dit punt zich horizontaal met

de wolkenbasis mee en wel zelfs harder dan de lager gelegen reeds losgelaten deeltjes. Brengt men dit in rekening, dan krijgt de slurf een totaal andere stand in de ruimte, die in figuur 19 met b is aangegeven. Men ziet hieruit, dat in geval van de gemaakte onderstellingen ook een dalende beweging een slurf zou opleveren waarvan de voet achter is ten opzichte van het bovenste gedeelte, evenals dit bij een stijgende beweging het geval zou moeten zijn.

Dat niettemin soms hozen worden waargenomen waarvan de voet vooruit loopt op het overige gedeelte, heeft geen andere betekenis, dan dat de onderstelling van een verticale stroming, scherp afgescheiden van een omringende ongestoorde, uitsluitend horizontale stroming waarvan de snelheid met de hoogte evenredig is, in werkelijkheid niet opgaat. Het hele bewegingsveld onder een cumulonimbus wordt beïnvloed door de processen, die zich in de wolk afspeelen.

Rossmann ziet verder de uitholling van het wateroppervlak, zoals deze soms in de voet van een waterhoos wordt aangetroffen, als een bewijs voor de neerwaartse stroming. Er is echter in 352 al op gewezen, dat men deze uitholling evengoed kan toeschrijven aan de uitwerking van de middelpuntvliedende kracht, die uit de wervelende beweging voortvloeit. In ieder geval is uit het geheel der waarnemingen wel duidelijk, dat aan de neerwaartse stroming, zo hij zich ooit voordoet, niet meer dan een ondergeschikte betekenis ten opzichte van de stijgende luchtbeweging kan worden toegekend.

Een onoverwinnelijke moeilijkheid voor de theorie van Rossmann moet het verklaren van de lage druk in het hooscentrum zijn. Door de grote gemiddelde dichtheid van de boven de hoosvoet gelegen koude lucht en neerslag, zou de druk in de hoosvoet groter moeten zijn dan in de omgeving; het tegengestelde zou trouwens in strijd zijn met de volgens Rossmann divergerende luchtbeweging langs het aardoppervlak. Wenst men, gelijk Rossmann doet, dynamische effecten in de redenering te betrekken, dan leiden deze in dezelfde richting. Immers het botsen van een scherp begrensde luchtstroom tegen een loodrecht oppervlak leidt tot een drukstijging in het stuwpunt*.

* Dit volgt voor ons geval direct uit de derde bewegingsvergelijking:

$$\frac{dv_z}{dt} = -\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

Hieruit blijkt immers, dat de opwaartse versnelling, die de lucht door de afremming ondergaat, tot een groter verticaal drukverval leidt, dus tot een hogere druk onder in de hoos.

Naar de theorie van Roszmann moet in de condensatieslurf zeer zware hagel of regen vallen, die daar echter voor zover ons bekend nooit met zekerheid in zijn waargenomen, ook niet in de gevallen, dat een zware hoos recht over de waarnemer heentrok ^{20, 27, 31}). Verder zou men verwachten, dat, wanneer de neerslag met de koude lucht eenmaal een doorgang naar beneden geforceerd zou hebben, deze allengs breder zou worden, waardoor men, wat zich aanvankelijk als een nog dunne slurf voordeed, langzamerhand tot een neerslaggebied van normale omvang zou moeten zien uitdijen, hetgeen nooit het geval is.

Ook de reeds door Wegener opgemerkte en door latere onderzoekers bevestigde plaats van de hoos buiten het midden van de wolk kan de theorie van Roszmann niet verklaren.

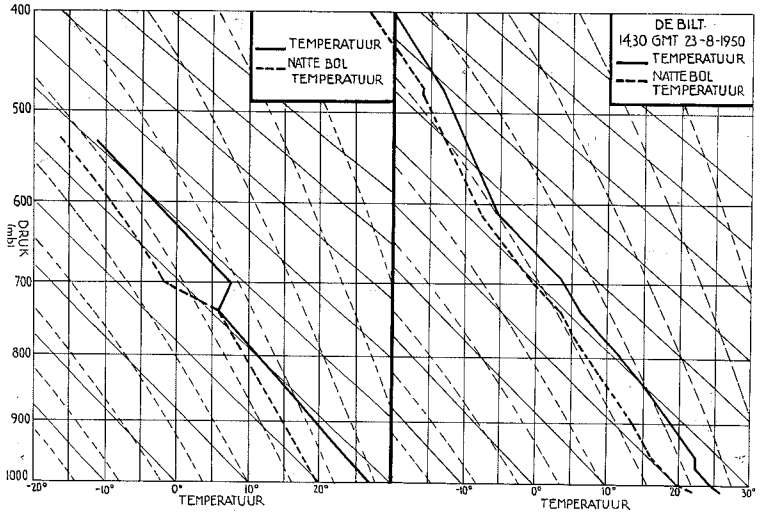
Vermoedelijk zijn Roszmann en Mügge tot hun theorieën geïnspireerd, doordat men de slurf van een zich ontwikkelende hoos in de regel van boven naar beneden ziet groeien. We vestigen er echter nogmaals de aandacht op, dat de beweging van de condensatieslurf geenszins representatief is voor de beweging van de lucht, daar het condensatieproces steeds voortgaat. De slurf kan daarom zeer goed tegen de luchtbeving in naar beneden groeien.

In de U.S.A. werden theorieën opgesteld, die in hoofdzaak zijn gegrond op de verschijnselen die zich bij de aldaar optredende tornado's voordoen. Als eerste hiervan zullen we ons bezighouden met

43 De theorie van Showalter (1943) ⁵⁵,

waarvan de grondslag bestaat uit de volgens Showalter vóór tornado's meestal aangetroffen verticale opbouw van de lucht. Deze opbouw is gekenmerkt door een zeer vochtige, potentieel onstabiele* laag marietische tropische lucht vanaf de grond tot een hoogte van maximaal ca 2700 m, begrensd door een temperatuurinversie of althans een stabiele laag, waarin echter de vochtigheid naar boven zo sterk afneemt, dat deze laag eveneens potentieel onstabiel is. Hierboven bevindt zich dan nog een dikke laag vrij droge voorwaardelijk onstabiele lucht – figuur 20 links. De windsprong, die zich in de grenslaag voordoet wordt ook van betekenis geacht.

* Een luchtlaag is potentieel onstabiel, indien hij door verdamping van doorvallende neerslag of door optilling onstabiel kan worden. Dit kan het geval zijn als de vochtigheid in de laag naar boven toe sterk afneemt.



Figuur 20. Links: De volgens Showalter voor het ontstaan van tornado's kenmerkende verticale temperatuur- en vochtigheidsverdeling. Rechts: Verticale temperatuur- en vochtigheidsverdeling 2½ h vóór de aankomst van de prae-frontale buienlijn, verbonden met de zware hoos over de Veluwe, 23 VIII 1950.

Volgens Showalter nu zal in de vochtige onderste laag door een of ander convergentieproces, dat bij voorbeeld met de nadering van een koufront kan samenhangen, een hoeveelheid lucht kunnen opstijgen en er in slagen de stabiele laag zo hoog op te tillen, dat de potentiële onstabiele laag in werkelijke onstabiele wordt omgezet. De opstijgende vochtige luchthoeveelheid kan hierdoor in de voorwaardelijk onstabiele bovenste laag binnendringen en tot het optreden van condensatie en de vorming van ijsdeeltjes, kortom tot het ontstaan van een flinke convectiewolk, aanleiding geven. Tenslotte wordt in de droge bovenste laag een hoogte bereikt, waar de temperatuur van de omringende lucht weer hoger is dan die van de wolk. Deze laatste wordt dan in zijn stijgende beweging geremd en gaat zich aan de bovenkant in horizontale richting uitspreiden. Valt uit dit overhangende gedeelte van de wolk hagel, dan zal deze, mede in verband met de windsprong in de stabiele grenslaag, door lucht vallen die tot dat moment nog niet gestoord was, maar die nu door de doorvallende hagel wordt afgekoeld. Door deze afkoeling gaat de potentiële onstabiele laag van de stabiele grenslaag en van de vochtige laag daaronder nu plotseling in

sterke onstabieleit over, wat een heftige verticale uitwisseling zal veroorzaken, die het ontstaan van de tornado tot gevolg heeft.

Het is niet duidelijk of deze enigszins ingewikkelde theorie ook voor buiten de U.S.A. voorkomende hozen bedoelt te gelden. Als dit het geval is moet het bezwaar gemaakt worden, dat van de 4 ons bekende gevallen van gelijktijdige hoogtewindwaarnemingen tot op voldoende hoogte in 3 gevallen de windsprong ontbrak *. Ook de verticale verdeling van temperatuur en vochtigheid is niet altijd zoals Showalter noodzakelijk acht, niet alleen in gevallen van hozen aan afzonderlijke cumulonimbi, maar zelfs waar het de meestal zeer krachtige hozen lans zogenaamde buienlijnen betreft. Als voorbeeld geven we de verticale opbouw vóór de beruchte hoos van 23 VIII 1950 over de Veluwe – figuur 20 rechts. Hieruit blijkt althans, dat zich buiten de U.S.A. prae-frontale windhozen, volkomen gelijkend op Amerikaanse tornado's, kunnen ontwikkelen in een geheel andere verticale opbouw, dan die welke door Showalter noodzakelijk wordt geacht.

Tenslotte moet opgemerkt worden, dat de theorie van Showalter zich in feite beperkt tot het geven van een oorzaak van de begeleidende sterke onstabieleitverschijnselen; hoe echter hieruit een tornado ontstaat blijft in het ongewisse. De volgende theorieën laten zich op dit punt iets nader uit.

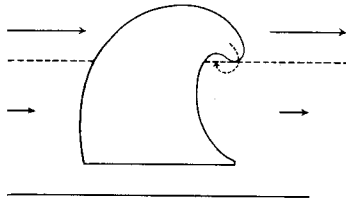
44 De mechanische theorie

vat een hoos op als een wervel, ontstaan aan het grensvlak van twee luchtstromen, en is als zodanig al heel oud. Ten aanzien van de ligging van deze twee luchtstromen ten opzichte van elkaar vallen twee opvattingen te onderscheiden, waarvan één vertegenwoordigd wordt door

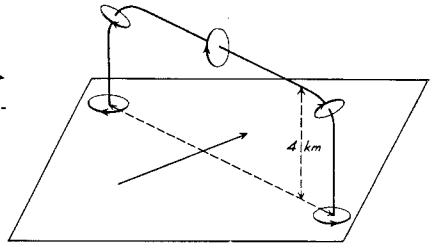
441 DE THEORIE VAN WEGENER

Wegener heeft de mechanische theorie gefundeerd en uitgebouwd in zijn in 1917 verschenen boek²⁴⁾ en in een in 1928 verschenen artikel²⁶⁾. De oorspronkelijke opvatting, dat de luchtstromen *naast* elkaar voortbewegen, verwierp hij, daar een scherpe windsprong aan het aardoppervlak door de hoos heen lang niet altijd door de waarnemers vermeld wordt; daarentegen grondde hij zijn theorie op de onderstelling, dat de luchtstromen *boven* elkaar liggen, gescheiden door een horizontaal vlak, waarin zich de windsprong voordoet, welk vlak hij op

* Deze gevallen worden bij de critiek op Wegener's theorie (44115) nader behandeld.



Figuur 21. Ontstaan van een horizontale lijnwervel achter de in de snellere bovenstrooming doordringende kop van een cumulonimbus, naar Wegener.



Figuur 22. Schematische weergave van de horizontale wervel met de naar beneden gebogen uiteinden. De grote pijl geeft de voortbewegingsrichting van het hele systeem.

een hoogte van ca 4 km vermoedde. De sterke verticale windschering* kan dan plaatselijk een in eerste aanleg horizontale, ongeveer star draaiende wervel veroorzaken. In het artikel geeft Wegener nader aan hoe hij zich het ontstaan van deze wervel voorstelt, namelijk als lijnwervel achter de kop van een in de snellere bovenstrooming doordringende cumulonimbus – figuur 21. De horizontale wervel volgt ongeveer de rand van de wolk, buigt dus aan weerskanten naar beneden en plant zich verder door middel van de inwendige wrijving via de lager gelegen luchtdeeltjes naar het aardoppervlak voort – figuur 22. Deze min of meer star draaiende kern is dan de zetel van de bewegingsenergie van de hoos; dat hieromheen een potentiaalstroming ontstaat (zie blz. 24), geschiedt slechts doordat de lucht buiten de kern door de turbulentie langzamerhand wordt meegesleept. Hierdoor ontstaat uiteindelijk het horizontale bewegingsveld als in figuur 16 aangegeven.

Wegener beroept zich op het volgende:

- a. De horizontale hoos is een enkele maal waargenomen.
- b. Bij drie hozen stelde Wegener het verschijnsel vast, dat opgezogen voorwerpen over een afstand van 10 à 16 km in horizontale richting door de wolk verplaatst werden en aan de andere kant van het neerslaggebied weer naar beneden vielen. Wegener trekt hieruit de gevolgtrekking, dat alleen een horizontaal in de wolk doorlopende wervel hiervoor verantwoordelijk kan zijn. Dat het verschijnsel zo zeldzaam is, moet dan verklaard worden uit de bijzonder krachtige opwaartse stroming, die nodig is om de voorwerpen eerst in het horizontale gedeelte te brengen.

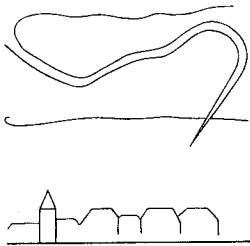
* De verticale windschering in een bepaald punt is de verandering van de horizontale luchtbeweging in verticale richting, per eenheid van afstand.

- c. De hoos vertoont bovenaan soms reeds een helling in de richting van het midden van de wolk, die de indruk wekt, dat de hoos in de wolk horizontaal verder loopt.
- d. De positie van de hoos *buiten* het midden van de wolk past goed in de theorie.
- e. Uit de ontstaanswijze van de wervel volgt, dat het horizontale deel een draaiingszin heeft, overeenkomende met die van een voortrollend wiel. Hieruit volgt weer, dat op het noordelijk halfrond de hozen aan de rechterkant van het wolkcentrum (hierna rechtse hozen genoemd) cyclonaal, de linkse anti-cyclonaal moeten draaien. Inderdaad gaven de 6 aan Wegener bekende gevallen een rechtse positie met cyclonale draaiing.

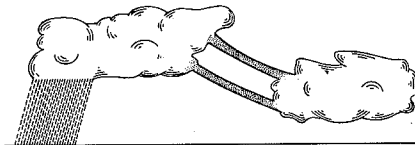
4411 *Critische beschouwingen naar aanleiding van de theorie van Wegener*

44111 Het bestaan van een horizontale wervel

Ad a. Wegener kan uit al zijn 258 onderzochte hooswaarnemingen slechts één geval vermelden, waarin blijkens een tekening en een beschrijving de hoos inderdaad een horizontaal gedeelte had. Later, in 1933, werd boven Maagdenburg een hoos waargenomen en zelfs gefotografeerd, waarvan het bovenste gedeelte ook de indruk maakte min of meer horizontaal te lopen⁵⁶). Onder de door ons onderzochte 295 beschrijvingen waren er 3, die melding maakten van een min of meer horizontale ligging, nl.: Weesperkarspel, 27 VII 1927⁵⁷). Eén der waarnemers nam een horizontale wervel waar. Ook volgens een andere waarnemer lag de hoos vrij horizontaal. Volgens een foto echter weer niet. Een twijfelachtig geval.



Figuur 23



Figuur 24

Assendelft, 6 VI 1934⁵⁸). De waarnemer meldt een hoosje, dat over een gedeelte horizontaal loopt, zo zelfs, dat aanvankelijk de bocht van de slurf nog in de wolk verborgen is – figuur 23. 6.5° N, 27.5° W, 14 VI 1928⁵⁹). Twee hozen, die als guirlandes van de ene wolk naar de andere lopen – figuur 24. Samenvattend kan men zeggen, dat hoewel verreweg de meeste hozen ongeveer verticaal staan, in uitzonderlijke gevallen hun helling inderdaad wel eens voor een groter of kleiner gedeelte als min of meer horizontaal kan worden beschreven.

Ad b. Het verschijnsel, dat opgezogen voorwerpen bij drie van de door Wegener onderzochte hozen aan de andere kant van het neerslaggebied (ook wel eens er in!) weer op de grond vielen, past wel in zijn theorie, maar het is niet duidelijk, waarom voor dit transport juist een horizontale wervel nodig is, gezien de grote snelheden die ook zonder zo'n wervel in een cumulonimbus blijken voor te komen.

Ad c. De ombuiging van de hoos in de richting van het wolkcentrum komt inderdaad wel voor. De meeste waarnemers van de door ons onderzochte hozen zwegen hieromtrent; bij 14 hozen bleek de ombuiging duidelijk wèl, bij 11 duidelijk niet aanwezig te zijn, dit op grond van beschrijvingen en/of foto's. Bij de hoos van Thiessow, onderzocht door Koschmieder⁴¹), was de ombuiging juist van het midden van de wolk af gericht. Ook als men afziet van de vele gevallen waarin de hoos geen duidelijke neiging naar het wolkcentrum toe, of zelfs een helling er van af heeft, dan nog hoeft een ombuiging *onder* de wolk in de richting van het centrum nog geenszins te wijzen op een horizontale ligging *in* de wolk. Immers, de helling kan eenvoudig samenhangen met de richting, waarin de ter plaatse door de cumulonimbus aangezogen lucht opstijgt, en deze kan zeer goed een component in de richting van het wolkcentrum hebben.

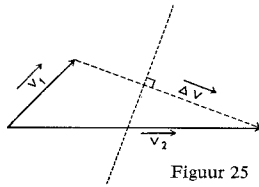
In ieder geval blijkt wel uit bovenstaande, dat de feiten, tot hiertoe behandeld, met de opvatting van een uitgestrekte horizontale wervel, die aan iedere hoos inhaerent zou zijn, wel is waar niet in tegenspraak zijn, maar er aan de andere kant toch ook allerminst toe dwingen. Wegener zelf beschouwde zijn systeem dan ook nog slechts als een werkhypothese. Echter zelfs als zodanig kleeft er reeds het aesthetische bezwaar aan, dat door de onderstelling ad hoc van een horizontale

wervel, de theorie in het gunstigste geval slechts de gewone, in de natuur voorkomende hozen kan verklaren, terwijl voor alle andere eerder genoemde luchtwervels, dus voor de zand- en stofhozen, de bij grote branden optredende hozen en de experimentele hozen, weer een geheel andere verklaring zou moeten worden gezocht. We zullen echter aantonen, dat de theorie ook voor het door Wegener beoogde beperkte doel te kort schiet.

44112 Het verband tussen de plaats van een hoos ten opzichte van het wolkcentrum en de draaiingszin. Zoals reeds gezegd vond Wegener, dat bij de 6 hem bekende combinaties van plaats ten opzichte van het wolkcentrum enerzijds en draaiingszin anderzijds, het verband met zijn theorie klopte, in zoverre, dat de 6 (Europese) hozen alle rechts waren en cyclonaal draaiden. Wat de door ons onderzochte hozen betreft, wij vonden, dat van het achttal rechtse (alle op noorderbreedte voorkomende) hozen 6 cyclonaal en 2, namelijk de hozen bij Doetinchem in 1931⁶⁰), waarschijnlijk anti-cyclonaal draaiden. Het aantal waarnemingen van de draaiingszin van linkse hozen is nog schaarser. Wel is indertijd gewicht gehecht aan de linkse hozen van Hindelopen in 1938⁶¹), die in overeenstemming met de theorie van Wegener anti-cyclonaal gedraaid zouden hebben. Het blijkt echter, dat de enige opgave van de draaiingszin van deze hozen, waaruit in dit geval tot een anti-cyclonale rotatie werd besloten, dubbelzinnig was in de op bladzijde 25 genoemde zin. Hierdoor blijft één geval van een betrouwbare waarneming van een linkse hoos met draaiingszin over, en wel de door Koschmieder onderzochte hoos van Dubrovnik in 1938⁴¹), waarin echter het samengaan van een linkse positie ten opzichte van het wolkcentrum en een cyclonale draaiing, in strijd dus met de theorie van Wegener uit beschrijvingen van ooggetuigen en uit foto's ondubbelzinnig is gebleken.

44113 Het ontbreken van waarnemingen van beide verticale werveluiteinden tegelijkertijd. De rechtse en de linkse hoos, die naar de opvatting van Wegener dus de uiteinden van één en dezelfde wervel zijn, zijn nooit gelijktijdig waargenomen. Koschmieder⁴¹) heeft trouwens het bezwaar geopperd, dat een dergelijke U-vormige wervel op zich zelf onmogelijk is, daar niet is in te zien, waar de aan weerszijden met orkaankracht binnenstromende lucht zou moeten blijven. Wegener heeft als mogelijke verklaring van het uitblijven van de bijbehorende tegengesteld draaiende

tweede hoos gewezen op de als gevolg van de wrijving langs het aardoppervlak meestal optredende windruiming met toenemende hoogte, waardoor een zekere asymmetrie in de hoosvorming wordt ingevoerd. Zijn redenering is ongeveer als volgt²⁶⁾:



Figuur 25

Zij \vec{v}_2 de vector van de wind boven het horizontale windsprongvlak, \vec{v}_1 die van de wind onder dat vlak, dan zal de voor het ontstaan van de wervel verantwoordelijke windsprong worden voorgesteld door de verschilvector $\Delta\vec{v}$ – figuur 25. De uit $\Delta\vec{v}$ voortkomende wervels staan loodrecht op deze verschilwind, en dus scheef ten opzichte van de trekrichting van de wolk, die volgens Wegener die van de bovenwind is. Bij het voortrollen verplaatst de gehele wervel zich ten opzichte van de cumulonimbus dus naar rechts, waardoor het linker einde, ondanks het feit dat het misschien aangroeit, weinig kans heeft buiten de wolk te geraken; het rechter einde daarentegen komt er als vanzelf uit rollen. Vandaar, volgens Wegener, het overwegen (op het noordelijk halfrond) van de rechtse positie van de hoos ten opzichte van het wolcentrum, en (op beide halfronden) van de cyclonale draaiingszin. De uitzonderingen hierop zijn dan aan het incidenteel voorkomen van krimpen van de wind met toenemende hoogte toe te schrijven.

Als dit laatste waar was, dan zouden de tornado's, die naar Humphreys⁶²⁾ optreden tijdens situaties, waarbij windruiming wel is waar blijft overheersen, maar waarbij krimpen van de wind met toenemende hoogte toch ook vaak voorkomt (koufronten!), even zovele malen anticyclonale draaiing moeten vertonen. Maar, zoals reeds eerder vermeld, is juist bij de tornado's de voorkeur voor cyclonale draaiing nog veel groter dan bij de overige hozen.

Trouwens, de hele windruiming als gevolg van de wrijving langs het aardoppervlak kan, ter hoogte van het windsprongvlak (ca 4 km, naar Wegener elders in ander verband aangeeft) geen invloed hebben, en het overheersen van cyclonale draaiing kan, zoals we later zullen zien, veel eenvoudiger verklaard worden.

44114 De axiale voortplanting van een lucht-wervel uitsluitend door de inwendige wrijving van de lucht. Teneinde aan te tonen, dat het zich voortplanten van lucht-wervels in de richting van hun as door middel van de inwen-

dige wrijving in beginsel mogelijk is, wijst Wegener in zijn boek op de experimenten van Weyer (zie blz. 15). Waarschijnlijk is het Wegener ontgaan, dat bij deze proeven een ventilator werd gebruikt, die langs de omtrek van een verticale cilindervormige rand was voorzien. Hierdoor werd de aangezogen en zijwaarts weggeslingerde lucht weer naar beneden afgebogen, waardoor een min of meer gesloten circulatiesysteem ontstond. Dat zich nu onder de ventilator inderdaad een wervel vormde werd dus niet veroorzaakt door de voortplanting door middel van de inwendige wrijving van de draaiende beweging naar beneden, maar door het feit, dat de van onder toestromende lucht al een keer door de ventilator was gegaan en hierdoor nog een vrij sterke rotatie had, die bij het weer toestromen naar de as volgens de perkenwet toenam. Letzmann en Dines kregen eveneens slechts één wervel onder hun ventilator als zij er op een of andere manier voor zorgden, dat de aangezogen lucht een aanvangsrotatie had: Letzmann deed dit door op de manier van Weyer een ongeveer gesloten circulatiesysteem teweeg te brengen, en Dines door, met behulp van een speciale opstelling van schotjes – figuur 13 – de toestromende lucht te leiden. De proeven van Letzmann^{8, 63}) om alleen door middel van de *inwendige wrijving* een wervel zich naar beneden voor te doen planten hadden alle een negatief resultaat: de draaiende beweging kwam niet verder dan een dun laagje onder zijn draaiende schijf, ook als met behulp van radiale oneffenheden op het oppervlak van de schijf de wrijving zo groot mogelijk werd gemaakt. Letzmann wees er op, dat dit resultaat zeer begrijpelijk is, als men bedenkt tegen welk een snelle opwaartse stroming de draaiende beweging zich naar beneden zou moeten voortplanten. Het lijkt derhalve wel zeer onwaarschijnlijk, dat een dergelijke voortplanting in de atmosfeer, waar de opwaartse stroming eveneens optreedt, wèl zou kunnen plaats vinden.

44115 Hoogtewindwaarnemingen tijdens het optreden van hozen. Het meest voor de hand liggende middel tenslotte om de theorie van Wegener op zijn juistheid te beproeven, is na te gaan of hozen inderdaad met een windsprong in de bovenlucht samengaan. Helaas zijn slechts weinig gevallen bekend waarin ongeveer gelijktijdig met het optreden van een hoos op niet te grote afstand waarnemingen van de wind tot op voldoende hoogte gedaan werden. Wegener zelf heeft noch in zijn boek noch in zijn later verschenen artikel hier voorbeelden van gegeven. Toch zijn, voornamelijk in een

latere tijd, wel waarnemingen gedaan, waarvan de hieronder een overzicht geven:

a. Borculo, 10 VIII 1925, 18h 40. Buitengewoon zware hozen.

2000 m	220°	31 m/sec		De Bilt, 13h 30
1500 m	220°	20 m/sec		
1000 m	200°	13 m/sec		
500 m	190°	5 m/sec		
2000 m	223°	36 m/sec		Ukkel (België), 16h 44
1500 m	226°	36 m/sec		
1000 m	222°	24 m/sec		
500 m	218°	16 m/sec		

b. Assendelft, 11 III 1930, 11h 25

2000 m	ZW	2,2 m/sec		De Bilt, 13h 30
1500 m	ZW	3,3 m/sec		
1000 m	WZW	5,0 m/sec		
500 m	WZW	2,5 m/sec		

c. Hindelopen, 12 VIII 1938, 16h 20

Hoogtewindwaarnemingen te Schiphol:

3000 m	OtZ	9 km/uur		ZO	7 km/uur		18h 00	
2000 m	NO	8 km/uur		NOTN	8 km/uur			
1500 m	NtO	10 km/uur		13h 00	NtW			13 km/uur
1000 m	NtO	9 km/uur		NNW	7 km/uur			
500 m	NNW	6 km/uur		NtW	8 km/uur			
200 m	NtO	8 km/uur		NW	6 km/uur			

d. Washington, 14 V 1927. Goed ontwikkelde tornado.

2300 m	ZW	22 m/sec
500 m	ZW	geleidelijk toenemend
0 m	ZO	zwak

e. Loosduinen, 29 III 1931.

2500 m	ONO	7,5 m/sec		De Bilt
1000 m	N	12 m/sec		

Tegen deze waarnemingen, die soms wèl, meestal géén belangrijke windtoename met de hoogte vertonen, kan men het bezwaar inbrengen, dat ze niet voldoende hoog reiken. Dit geldt niet voor het volgende geval, waarin de waarneming van de wind wel is waar op 2500 m

afgebroken werd, maar waarin de wolk in kwestie zich, volgens opgave van vliegers die gelijktijdig in de lucht waren, bevond tussen de niveau's van 400 en 900 m. Een windsprong die voor de bijbehorende hoos verantwoordelijk was had dus zeker opgemerkt moeten worden.

A. Warnemünde, 20 IX 1928, 7h 35¹³). Zwakke hoos, geen storing aan het aardoppervlak.

2500 m	W	16 m/sec
2000 m	WtN	12 m/sec
1500 m	WNW	11 m/sec
1000 m	NWtW	9 m/sec
500 m	NWtW	8 m/sec
200 m	WtN	4 m/sec
grond	W	4 m/sec

Waarneming te 6h 35 op
12 km afstand.

Men ziet, dat van een markante windsprong weinig is te bespeuren. Dit is evenmin het geval bij de volgende twee waarnemingen, die wèl tot op grote hoogte reiken:

B. Dorpat, 6 VII 1918, 13h 17¹²). Zwak ontwikkelde hoos.

Hoogtewindwaarneming ca 10 min eerder op 3,5 km afstand:

4700 m	Z	1 m/sec	1000 m	W	1 m/sec
4500 m	ZZO	1 m/sec	800 m	WNW	2 m/sec
4000 m	Z	1 m/sec	700 m	NW	1 m/sec
3500 m	stil		600 m	N	2 m/sec
3000 m	stil		400 m	N	3 m/sec
2500 m	NNO	2 m/sec	300 m	N	0,7 m/sec
2000 m	ZZW	1 m/sec	200 m	NNO	0,6 m/sec
1500 m	ZO	4 m/sec	100 m	N	1 m/sec

C. Maagdenburg, 16 VII 1933, 15h 30⁵⁶).

Waarnemingen van alle Duitse stations melden, volgens Koschmieder, die dit geval onderzocht heeft, over de hele namiddag zeer geringe winden tot op grote hoogte:

Van 0 m tot 5000 m: windsnelheid \leq 5 m/sec.

Van 5000 m tot 14000 m: windsnelheid \leq 10 m/sec.

Windtoename met de hoogte meest 1 à 2 m/sec per 500 m hoogteverschil.

Slechts in het volgende geval werd een wat grotere verticale windschering gevonden:

D. Montgomery, Alabama, U.S.A., 12 II 1945, 16h 22⁶⁴). Goed ontwikkelde tornado.

Radiowaarnemingen om 15h 00:

8000 m	245°	43 m/sec	3000 m	216°	28 m/sec
7000 m	242°	39 m/sec	2000 m	206°	25 m/sec
6000 m	240°	35 m/sec	1000 m	182°	18 m/sec
5000 m	235°	31 m/sec	0 m	190°	16 m/sec
4000 m	228°	29 m/sec			

De afwezigheid van enige noemenswaardige windsprong in de gevallen A, B en C is wel zeer opvallend en ons inziens beslissend voor de gehele theorie van Wegener, waarin deze windsprong immers essentieel is.

Overigens is het ook nauwelijks denkbaar, dat een wervel met de omwentelingssnelheid van een hoos zou kunnen ontstaan uit windschering zonder meer, dus zonder dat die omwentelingssnelheid door een gelijktijdig convergerende beweging van de deeltjes in verband met de perkenwet sterk toeneemt. In dat geval immers kan de draaiing van de hoos niet sneller zijn dan uit de oorspronkelijke aanwezige windschering volgt, wat hierop neerkomt, dat voor het ontstaan van een normale hoos met een wind van 50 m/sec op 50 m afstand van het hooscentrum, een windschering van minstens 100 m/sec per 100 m hoogteverschil aanwezig had moeten zijn!

In dit licht gezien heeft ook de in geval D waargenomen windschering van maximaal 7 m/sec per 1000 m hoogteverschil voor de theorie van Wegener geen betekenis.

44116 Samenvatting van de critiek op de theorie van Wegener

- a. De verschijnselen door Wegener als argumenten aangevoerd dwingen niet tot de onderstelling, dat een hoos zich als een horizontale wervel binnen in de wolk voortzet.
- b. De combinatie van draaiingszin en positie ten opzichte van het

centrum van de bijbehorende wolk is in één geval zeker, in twee gevallen waarschijnlijk in strijd met de theorie van Wegener.

- c. De twee verticale uiteinden van de wervel worden nooit gelijktijdig waargenomen. De verklaring, die Wegener hiervoor geeft, is onwaarschijnlijk.
- d. Het zich voortplanten van de wervel naar beneden door middel van de wrijving, tegen de krachtige, naar boven gerichte stroming, is zeer twijfelachtig.
- e. Voor het ontstaan van een snel draaiende „glijwervel”, alleen door het omzetten van windschering in rotatie, is een buitengewoon grote windschering nodig, die in de vier gevallen waarvan windwaarnemingen tot op voldoende hoogte ter beschikking staan niet aangetroffen werd.

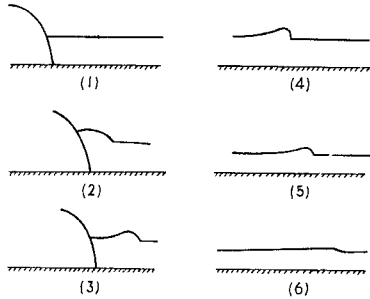
De theorie van Wegener lijkt ons op grond van bovenstaande bezwaren niet aanvaardbaar. Onlangs is een nieuwe vorm van de mechanische theorie, namelijk

442 DE THEORIE VAN TEPPER (1950)^{65, 66}), voorgesteld, waarin de zich langs elkaar heen bewegende luchtstromen weer *naast* elkaar ondersteld worden.

Tepper's tornadotheorie is te beschouwen als een bijproduct van zijn theorie van buienlijnen, zoals deze zich voornamelijk in de warme lucht aan de voorkant van koufronten wel eens voordoen. Deze buienlijnentheorie houdt het volgende in. In de prae-frontale lucht bevindt zich veelal een scherpe inversie of althans een stabiele laag (zie ook 43), waarin de potentiële temperatuur * een flinke toeneming met de hoogte vertoont. In deze grenslaag kan door verschillende oorzaken een zwaartekrachtsgolf ** worden opgewekt. Als een van deze oorzaken wordt gegeven een plotseling tijdelijk versnelde beweging van het koufrontvlak, gevolgd door een vertraagde beweging – figuur 26. Door opstuwing van de lucht aan de voorkant van het koufrontvlak wordt dan de grenslaag ter plaatse verhoogd en ontstaat een golf, die

* Zie noot op blz. 64.

** Een zwaartekrachtsgolf is een golf, die zich uitsluitend door het *dichtheidsverschil* van de aan weerszijden van het grensvlak zich bevindende media handhaaft. Dit in tegenstelling met bijvoorbeeld een glijdingsgolf, die zijn ontstaan aan het *snelheidsverschil* dankt.



Figuur 26. Ontstaan van een zwaartekrachtsgolf in een praefrontale stabiele laag als gevolg van een tijdelijk versnelde voorwaartse beweging van het koufrontvlak, volgens Tepper. In de laatste drie schetsjes is het koufrontvlak weggelaten.

voortuiloop met een snelheid groter dan die van het inmiddels weer tot zijn oorspronkelijke snelheid teruggekeerde koufrontvlak. Als tweede mogelijkheid voor de vorming van een zwaartekrachtsgolf in de stabiele laag wordt geopperd het binnendringen van sterke winden in gebieden waar tot dat ogenblik slechts zwakke winden waaiden; dit komt boven het midden van de U.S.A. voor wanneer het Noord-Atlantisch subtropisch gebied van hoge druk plotseling een uitloper in westelijke richting vormt.

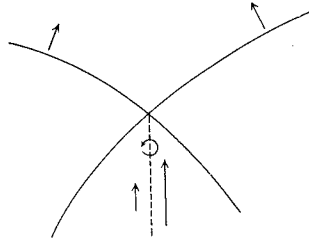
Is de golf eenmaal gevormd, dan moet hij volgens theoretische beschouwingen aan de top harder gaan lopen dan aan de voet, wat een steeds steiler worden van de voorkant met zich mee brengt. Het overtrekken van deze voorkant gaat derhalve van een plotselinge drukstijging aan de grond vergezeld, de zogenaamde „pressure-jump”. De lucht aan weerszijden van de stabiele laag wordt aan de voorkant van de golf omhoog gedrukt, wat bij voldoende vochtigheid tot de bewolking en neerslag van de buienlijn aanleiding geeft.

Alvorens over te gaan tot de eigenlijke tornado-theorie van Tepper, kunnen hier reeds enige bezwaren aangevoerd worden. Ten eerste wordt niet aangegeven, waardoor een koufrontvlak plotseling sneller voort zou gaan en daarna weer langzamer. Dat het binnendringen van sterke winden, daar, waar eerder slechts zwakke winden waaiden, zo plotseling in zijn werk gaat, dat daardoor als bij het plotseling binnenvallen van water in een kanaal een soort translatiegolf zou ontstaan, lijkt ook twijfelachtig. Moeilijk aanvaardbaar is tenslotte de consequentie van de theorie, dat ook in het buiengebied de stabiele laag aanwezig moet zijn. Dit immers is onverenigbaar met de krachtige verticale bewegingen in de buien.

Het ontstaan van tornado's gaat volgens Tepper nu als volgt in zijn werk. Het gebeurt soms, dat twee zwaartekrachtsgolven elkaar kruisen. Langs het verticale vlak, dat gedacht kan worden door de lijn,

die door het snijpunt van de golven wordt beschreven, kan nu een scherpe horizontale windschering* optreden, die aanleiding tot het ontstaan van zich verder tot tornado's ontwikkelende glijwervels zou kunnen geven – figuur 27.

De onderstelling van de horizontale windsprong veroorzaakt door de snijding van de zwaartekrachtsgolven in de stabiele laag is zuiver hypothetisch en alleen gegrond op een dergelijk gebeuren bij de ontmoeting van schokgolven. In Tepper's theorie is de tornadovorming niet afhankelijk van het al of niet optreden van neerslag. De opvallende voorkeur van tornado's en andere hozen voor het gebied aan de buitenkant van neerslagkolommen doet echter vermoeden, dat de neerslag wel degelijk een rol speelt. Tenslotte wijzen we nogmaals op de verticale opbouw voorafgaande aan de hoos van 23 VIII 1950 – figuur 20 rechts – waarin een duidelijke stabiele laag ontbreekt.



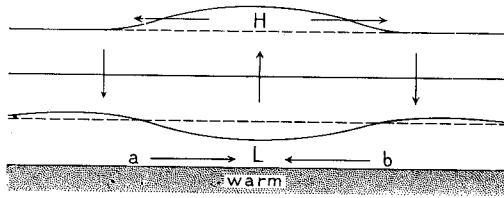
Figuur 27. Ontstaan van een wervel in het verticale windsprongvlak, door de kruising van twee zwaartekrachtsgolven teweeg gebracht, volgens Tepper.

Als klassieke tegenhanger van de mechanische, geldt de

45 **thermo-dynamische theorie**, een enigszins willekeurige benaming (ook de theorieën van Mügge en Roszmann bijvoorbeeld zijn strikt genomen thermo-dynamische) voor een theorie, reeds in 1753 door Franklin geopperd en sindsdien, soms met kleine wijzigingen, door verschillende meteorologen verdedigd.

451 *Algemeen.* De theorie ziet een hoos als onderdeel van een thermisch circulatiesysteem. Een dergelijk systeem ontstaat door ongelijkmatige verwarming of afkoeling van het aardoppervlak, en wel, bij voorbeeld, op de volgende wijze. Gesteld, dat zich boven het aardoppervlak lucht bevindt, die aanvankelijk in horizontale richting geen druk- en temperatuurverschillen vertoont, en dat vervolgens, bij voorbeeld onder invloed van de zonnestraling en in verband met een verschil in bodemgesteldheid, het aardoppervlak tussen *a* en *b* – figuur 28 – meer verwarmd wordt dan het omgevende gedeelte. De lucht, grenzend aan het aardoppervlak tussen *a* en *b*, zal dan eveneens meer

* De horizontale windschering in een punt van een horizontaal windveld is het snelheidsverval in de richting loodrecht op de wind.



Figuur 28.
Verticale druk- en circulationsysteem van een thermische depressie.

verwarmd worden en dus sterker uitzetten dan de omgevende lucht. De oorspronkelijk horizontaal liggende vlakken van gelijke druk in de hogere lagen zullen hierdoor boven het extra verwarmde gebied naar boven gaan opbollen, hetgeen wil zeggen, dat de druk hier nu hoger gaat worden dan in de omgeving op dezelfde hoogte. Onder invloed van dit horizontale luchtdrukverval zet zich een buitenwaartse beweging van de lucht boven het extra verhitte gedeelte in, die aan de grond tot uiting komt in een drukdaling in het verwarmde gedeelte en een drukstijging daarbuiten. Hiermee is de zogenaamde thermische depressie ontstaan, onder invloed waarvan de lucht langs de grond van buiten naar binnen gaat stromen. Tevens zetten zich verticale vereveningsstromingen in: de warmere lucht gaat naar boven, terwijl de koudere in de omgeving naar beneden zakt. Er ontstaat dus een min of meer gesloten circulationsysteem.

Ondanks de langs het aardoppervlak toestromende lucht kan de thermische depressie zolang de ongelijkmatige verwarming duurt blijven bestaan, en wel voornamelijk als gevolg van de wrijving, die de convergentie langs het aardoppervlak veel meer tegenwerkt dan de divergentie op grotere hoogte.

Bij voldoende vochtigheid komt de opstijgende warme lucht door dynamische afkoeling tot condensatie. Bij voortgaande opstijging ontstaat ijs. De bij deze processen vrijkomende latente condensatie-, sublimatie- en stollingswarmte heeft de uitwerking van een extra verwarming en versterkt als zodanig de horizontale drukverschillen zowel als de circulatie.

Indien men, in plaats van een verwarming of extra-verwarming ter plaatse, uitgaat van een afkoeling of extra-afkoeling van de omgeving krijgt men het zelfde resultaat.

Een dergelijk thermisch circulationsysteem kan de meest uiteenlopende afmetingen hebben, en is, onder andere, van toepassing op een in staat van ontwikkeling verkerende stapelwolk⁶⁷). Deze ontstaat dan, doordat de waterdamp in een opstijgende warme luchtstroom van beperkte diameter gaat condenseren. Vormt zich in zo'n wolk neerslag, dat wil

zeggen: gaat de cumulus over in een cumulonimbus, dan treedt een later te behandelen complicatie in stromingssysteem en drukverdeling op, maar ook in dat stadium vindt men in ieder geval plaatselijk krachtige opstijgende luchtstromingen, met lage druk en convergentie aan de grond, en naar buiten uitvloeiende luchtbeweging op grotere hoogte.

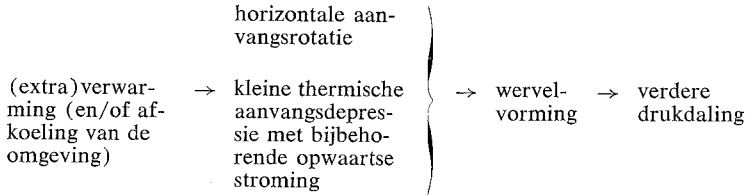
Volgens de thermo-dynamische theorie nu zal een verticale wervel onder een stapelwolk kunnen ontstaan langs de as van een in de wolk opstijgende krachtige luchtstroom, indien de langs de grond van alle zijden toestromende lucht van het begin af, behalve een beweging naar de kern toe (radiale beweging), ook een zekere zijdelingse beweging (normale beweging) heeft. Men drukt dit uit door te zeggen, dat de horizontale beweging enige aanvangsrotatie vertoont, waardoor de toestroming a-centraal is. Bij afwezigheid van wrijving neemt de normale snelheid van de toestromende deeltjes volgens de perkenwet ($v_n \times r = \text{constant}$) toe. De middelpuntvliedende kracht, die op zijn beurt uit deze rotatie voortvloeit, zal dientengevolge in de richting van de as enorm (namelijk evenredig met $\frac{v_n^2}{r}$ of met $\frac{1}{r^3}$) toenemen en een nog verdere toestroming in de richting van het centrum grotendeels verhinderen. Gaat het wegvloeien van de lucht in de hogere in de wolk gelegen lagen nu nog enige tijd door, dan zal de druk aan de grond in de kern van de wervel tot zeer lage waarden kunnen dalen. Volgens deze redenering is de uit de rotatie volgende middelpuntvliedende kracht niet de *oorzaak* van de lage kerndruk, maar wel verhindert hij, dat deze lage druk – die door andere processen, van thermische aard, wordt voortgebracht – wordt opgeheven. Dat in feite de lucht langs het aardoppervlak in een hoos toch nog meer convergeert dan deze redenering zou doen vermoeden, is een gevolg van de in werkelijkheid langs het aardoppervlak optredende wrijving.

De mogelijkheid van het ontstaan van een verticale wervel door horizontale convergentie in een continuum met horizontale aanvangsrotatie wordt aangetoond door te wijzen op de wervel, die ontstaat als men een met een vloeistof gevuld vat door een gat in de bodem laat leeglopen, nadat men de vloeistof een kleine aanvangsrotatie heeft gegeven.

De oorzakelijke samenhang, naar de mechanische theorie schematisch weer te geven door

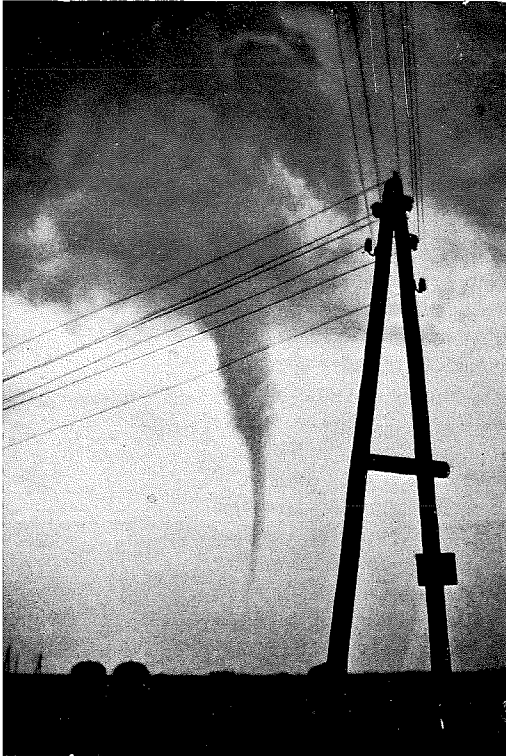
windschering → glijwervelvorming → drukdaling

is volgens de thermo-dynamische theorie dus voor te stellen door



In de loop der tijden zijn verschillende meningen geuit omtrent de ware aard van de primaire thermische factoren, die tenslotte tot de ontwikkeling van de hoos leiden. Zien we van dit probleem – waar we later nader op terug komen – voorlopig af, dan kan men zeggen, dat

alle variaties van de thermo-dynamische theorie dit gemeen hebben, dat zij een opstijgende stroming boven een horizontaal bewegingsveld met aanvangsrotatie als wezenlijk zien. Als zodanig heeft de theorie reeds het voordeel, dat hij van toepassing is op alle door ons besproken soorten van lucht-wervels. Immers zowel de gewone hozen als die welke boven grote branden ontstaan, én de zand- en stofhozen én de experimentele hozen worden door krachtige opwaartse stroming gekenmerkt, terwijl de rol van de beginrotatie als tweede voorwaarde het duidelijkst in het experiment tot uiting komt. Zo stelde Exner⁶⁸⁾ vast, dat zijn wervels evenmin ontstonden bij een verticale stroming zonder aanvangsrotatie als bij een aanvangsrotatie zonder verticale stroming, doch uitsluitend als gelijktijdig voldaan was aan de voorwaarden van *krachtige verticale stroming* en *voldoende horizontale*



Figuur 29. Hoos nabij Hindelopen, 12 VIII 1938.

Foto B. C. Elskamp.



Figuur 30. Zelfde hoos 7 min later.

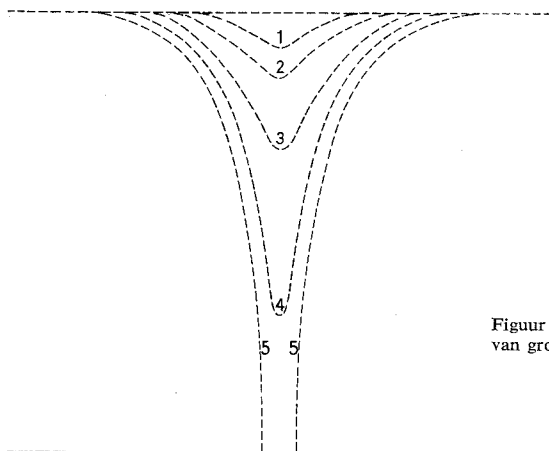
Foto B. C. Elskamp.

aanvangsrotatie, welke voorwaarden we derhalve als kinematisch nodig en voldoende voor het optreden van alle hier behandelde verticale luchtwervels zouden willen bestempelen.

Beschouwen we de vraag, welke thermische factoren bij het ontstaan van een hoos nu precies in het spel zijn, gemakshalve nog even als reeds opgelost, dan kunnen verschillende verschijnselen op eenvoudige wijze verklaard worden. Hier volgen een drietal voorbeelden.

4511 *Het schijnbaar vanuit de wolk naar beneden groeien en de trechtersvorm.* Neemt men, om de gedachten te bepalen, aan, dat alle zich onder de wolk aan het aardoppervlak bevindende lucht de zelfde uitgangstemperatuur, -druk en -vochtigheid heeft, dan zullen alle luchtdeeltjes die adiabatisch afgekoeld worden, hetzij door een opstijgende beweging naar de wolk, hetzij door een horizontale in de richting van

de hoos, hetzij door een samenstel van beide, bij één zelfde druk hun verzadigingstoestand bereiken en tot condensatie aanleiding gaan geven. Dit houdt in, dat het vlak waarin deze druk heerst op ieder oogenblik met de onderkant van de wolk en de buitenkant van de condensatieslurf samenvalt. In het begin van de ontwikkeling van de hoos is de wervelbeweging nog zwak en dus de horizontale drukstoring nog gering, het verzadigingsdrukvlak zal dan een verticale doorsnee ver-



Figuur 31. Meest voorkomende wijze van groeien van de hoosslurf.

tonen als in figuur 31, 1. Bij verdere ontwikkeling van de wervel wordt de put in dit drukvlak steeds dieper, om tenslotte het aardoppervlak te bereiken. In overeenstemming hiermee ziet men in de meeste gevallen de slurf als uitstulping van de wolkenbasis ontstaan en zich vervolgens trechtervormig in de richting van het aardoppervlak verlengen. Blijkbaar groeit de slurf aan tegen de luchtbeweging in. Het is nodig dit onder de aandacht te brengen, daar in het naar beneden groeien van de slurf vaak een bewijs is gezien, dat de lucht in een hoos naar beneden stroomt (zie Roszmann), of dat de hoos als bewegingssysteem van boven naar beneden groeit (Wegener). In verband met dit laatste wijzen we nog eens op het vooral bij waterhoozen dikwijls waarneembare verschijnsel, dat de wervel zich aan het aardoppervlak reeds openbaart vóórdat de slurf naar deze oppervlaktestoring is toegegroeid.

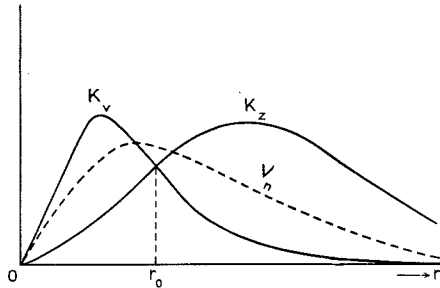
4512 *Het overwegen van de cyclonale draaiingszin*, dat Wegener toeschreef aan een asymmetrie in de vorming van de horizontale werfel, waardoor op het noordelijk halfrond meestal slechts het rechtse einde de grond zou bereiken, kan uitgaande van de thermo-dynamische theorie veel eenvoudiger worden verklaard.

De draaiingszin van een hoos wordt dan bepaald door de zin van de aanvangsrotatie van het horizontale windveld waarin de hoos zich vormt. Deze is in 't algemeen cyclonaal, daar de lucht in eerste benadering met het aardoppervlak meedraait. In het bijzonder doet de cyclonale rotatie zich voor in depressies, in voren en troggen en langs fronten, en het zijn juist deze gebieden waarin krachtig ontwikkelde cumulonimbi en daardoor ook hozen het meest worden aangetroffen. Dat hozen in meerderheid cyclonaal draaien is dus geen wonder.

Zeere sterke concentraties van de cyclonale rotatie in het horizontale windveld kan men aantreffen aan de voorkant van buienlijnen⁶⁹). Hozen, die hier ontstaan, moeten dus een extra grote kans hebben cyclonaal te draaien. Inderdaad is de frequentie van de cyclonale draaiingszin van tornado's, die, zoals bekend, overwegend aan buienlijnen voorkomen, nog groter (95 %) dan bij de elders voorkomende hozen.

4513 *De condensatievrije ruimte langs de as van de slurf* (zie ook blz. 28). In een hoosslurf wordt een groot aantal onderling ongeveer gelijke condensatiedruppeltjes meegesleept. In het horizontale vlak werken op ieder van deze deeltjes in hoofdzaak de volgende twee krachten.

1. Een *middelpuntvliedende kracht* als gevolg van de normale snelheid v_n . Omtrent deze snelheid kan men heel in 't algemeen zeggen, dat hij van buiten naar binnen toeneemt, om na het bereiken van een zeker maximum weer af te nemen, daar in het kernpunt de normale snelheid gelijk nul moet zijn. Het ver-



Figuur 32. Het ontstaan van de condensatiemantel op enige afstand rondom de as 0 als gevolg van het samenspel van middelpuntvliedende en middelpuntzoekende kracht.

loop van v_n met de afstand r tot het kernpunt zou dus door een kromme ongeveer als in figuur 32 kunnen worden aangegeven. De deeltjes, die zich met deze snelheid om de kern heen bewegen zullen een middelpuntvliedende kracht K_v ondervinden die evenredig is met $\frac{v_n^2}{r}$. Het verloop van K_v vertoont daarom een scherp maximum op nog geringere afstand van de as dan het maximum in v_n .

2. Een *middelpuntzoekende kracht*, voortvloeiende uit de binnenwaartse beweging van de lucht die de deeltjes omringt. Deze kracht is gelijk nul op grote afstand buiten de hoos en eveneens in het kernpunt; ergens hier tussen in moet hij een maximum bereiken. De kracht zou dan met de afstand r kunnen verlopen ongeveer als door de kromme K_z in de figuur aangegeven.

Indien nu de krommen K_z en K_v elkaar op een afstand $r = r_0$ snijden – het geval, dat door de figuur wordt weergegeven – dan wil dit zeggen, dat voor $r > r_0$ de middelpuntzoekende, voor $r < r_0$ de middelpuntvliedende kracht overweegt. Op afstand $r = r_0$ is er evenwicht. De condensatiedruppeltjes, die in een in de kern geconcentreerd gebied zijn ontstaan, zullen dus de neiging vertonen zich op de afstand r_0 van de as te verzamelen. De „holle kern” is hiermee in beginsel verklaard.

K_v en K_z hangen, behalve van r , nog van talloze factoren af. Het is daarom ook denkbaar, dat onder andere omstandigheden K_z op iedere afstand r groter is dan K_v . In dat geval ontstaat geen condensatievrije kern.

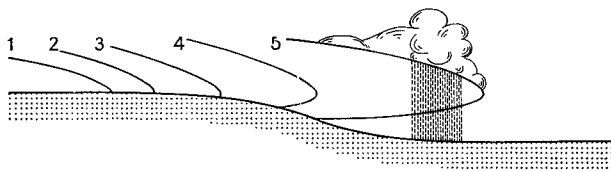
Het eerste geval zal zich voordoen als de rotatie groot is ten opzichte van de convergentie, dus vooral bij waterhozen, waar de rotatie weinig geremd wordt door de wrijving en de wrijvingsconvergentie dientengevolge gering is. In dit verband is het interessant op te merken, dat van de door ons onderzochte hozen de holle kern werd waargenomen bij 16 van de 172 (9.3 %) waterhozen, maar slechts bij 3 van de 117 (2.6 %) landhozen. De waarschijnlijkheid, dat alleen het toeval een dergelijk of groter verschil in relatieve frequentie veroorzaakt, blijkt slechts 4.5 % te zijn, zodat het verschil inderdaad als reëel beschouwd mag worden.

Voor de aanwezigheid van andere deeltjes (zandkorrels, grotere waterdruppels) geldt een overeenkomstige redenering. In 't algemeen zullen verschillende deeltjes hun evenwicht op verschillende afstanden tot de as vinden.

Het omstreden punt van de theorie, dat we voorlopig even zijn voorbij gegaan, is de wijze, waarop in de natuur thermische factoren nu precies de zeer krachtige opwaartse stroming tot stand brengen. Met betrekking tot de bij grote branden zich vormende hozen zowel als tot de stof- en zandhozen is het duidelijk, dat de voor het optreden van de wervel verantwoordelijke opwaartse stroming direct uit de plaatselijke verhitting van de lucht voortvloeit. Het circulatiesysteem is dan zeer eenvoudig en beantwoordt in beginsel geheel aan dat van figuur 28.

De theorie in zijn oudste vorm wil ook het ontstaan van hozen aan cumuliforme wolken op deze wijze verklaren. Zo'n hoos zou zich dan vormen langs de as van de stijgwind die de stapelwolk voedt. Uit latere onderzoekingen⁷⁰⁾ is echter gebleken, dat de aan deze theorie ten grondslag liggende eenvoudige opvatting van de luchtcirculatie in en om een cumuliforme wolk alleen juist is voorzover het een cumuluswolk betreft. Het blijkt echter (zie 31), dat goed ontwikkelde hozen zich uitsluitend aan cumulonimbi vormen. Tevens is uit metingen^{67, 70)} gebleken, dat de thermische depressie onder een groeiende cumulus zeer ondiep (ca 0.5 mb) en vlak is, en de opwaartse stroming in verband hiermee niet zeer krachtig en weinig geconcentreerd. Het lijkt dan ook waarschijnlijk, dat deze oudste opvatting hoogstens voor de soms waargenomen zwakke hoosjes of hoosachtige uitsteeksels aan cumuli van toepassing is, maar dat voor de normale, krachtig ontwikkelde hozen zoals deze met hun 50 à 200 mb diepe drukput onder cumulonimbi voorkomen, een andere verklaring moet worden gevonden. In 't bijzonder moet een aannemelijke oorzaak voor de primaire, zeer krachtige en geconcentreerde opwaartse stroming worden gegeven. Verschillende wijzigingen van de oorspronkelijke theorie kunnen als pogingen in deze richting worden opgevat.

4521 *De theorie van Fulks* (1943)⁵⁵⁾. In deze (tornado)theorie speelt het bodemrefief een zekere rol. De tornado's tonen namelijk een uitgesproken voorkeur voor de laagvlakten van de Mississippi, beoosten de uitgestrekte hoogvlakten die oplopen naar de Rocky Mountains. De theorie komt in 't kort op het volgende neer. De achter het koufront (Fulks gaat er van uit, dat tornado's aan of vlak vóór koufronten voorkomen) naar het oosten stromende koude lucht wordt tijdens zijn tocht over de westelijke hoogvlakten warmer, onstabiel en droger. Komt deze aangewarmde „koude” lucht in de laagvlakte aan



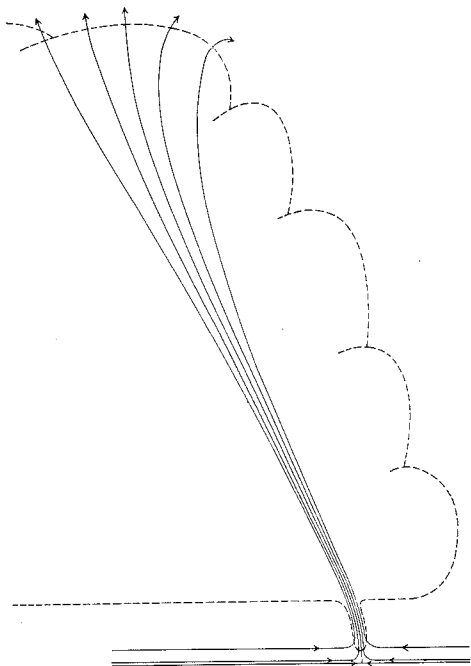
Figuur 33. Illustratie van de manier waarop volgens Fulks een over de westelijke hoogvlakten van de U.S.A. naderend koufrontvlak vervormd kan worden.

Illustratie voor verantwoordelijkheid van de schrijver.

dan kan hij een potentiële temperatuur* hebben bereikt, die hoger is dan die van de maritieme tropische lucht er vóór dicht bij de grond, maar lager dan die van de maritieme tropische lucht op grotere hoogte. Dit brengt met zich mee, dat de voorkant van de „koude” lucht het aardoppervlak zal verlaten, en als een wig in de vochtige maritieme tropische lucht verder zal dringen – figuur 33. Het opgetild worden van deze lucht aan de boven-voorkant van de wig veroorzaakt daar vorming van wolken en neerslag, welke laatste de droge lucht van de wig sterk afkoelt. Hierdoor ontstaat een zeer grote onstabiele, die aanleiding geeft tot de heftige stijgende en dalende bewegingen van de zogenaamde praefrontale buienlijn. In combinatie met de sterke cyclonale horizontale windrotatie, die aan de voorkant van deze buienlijnen meestal wordt aangetroffen, kunnen hier tornado's ontstaan. Het al te eng koppelen van het optreden van tornado's aan het overtrekken van een koufront is als een nadeel van deze theorie te beschouwen, want hoewel tornado's meestal wel van een koufront vergezeld gaan, is dit toch niet altijd het geval¹⁾. Er zijn zelfs voorbeelden van krachtige tornado's, die op geen enkele wijze met enig front in verband konden worden gebracht⁶⁴⁾.

4522 *De theorie van Koschmieder (1940)*^{41, 71)} zoekt het eveneens in de verticale opbouw van de lucht. Bevindt zich namelijk in of boven de met de hoos samenhangende cumulonimbus een zwakke inversie,

* De potentiële temperatuur van een luchtdeeltje is de temperatuur, die dat deeltje zou krijgen als het droog-adiabatisch naar het vlak van 1000 mb zou worden gebracht. Dit houdt in, dat droog-adiabatisch opstijgende of dalende luchtdeeltjes niet van potentiële temperatuur veranderen. In 't algemeen is de thermische opbouw van de atmosfeer zodanig, dat de potentiële temperatuur naar boven toeneemt. Een luchtdeeltje met een bepaalde potentiële temperatuur zal in een bepaalde atmosfeer op die hoogte zijn evenwicht vinden, waar de potentiële temperatuur gelijk is aan die van het deeltje zelf.



Figuur 34. Vorming van een hoos door het plotseling naar boven schieten van een „luftpakket“ in een cumulonimbus, volgens Koschmieder.

waardoor de ontwikkeling van de cumulonimbus tijdelijk tegengehouden wordt, dan kan zich het geval voordoen, dat een „luftpakket“ met iets hogere uitgangstemperatuur en/of -vochtigheid in staat is deze inversie te doorbreken en in de daarboven gelegen voorwaardelijk onstabiele laag naar boven te schieten. Het het pakket een grote doorsnee (bijvoorbeeld 100–1000 m), dan wordt de in het zog er van ontstane drukdaling naar beneden overgebracht. Tijdens het toestromen van de lucht ontstaat dan weer bij voldoende horizontale aanvangsrotatie op de bekende wijze de hoos – figuur 34. Deze zal zolang voort blijven duren als de opstijgende beweging van het luchtpakket voortduurt.

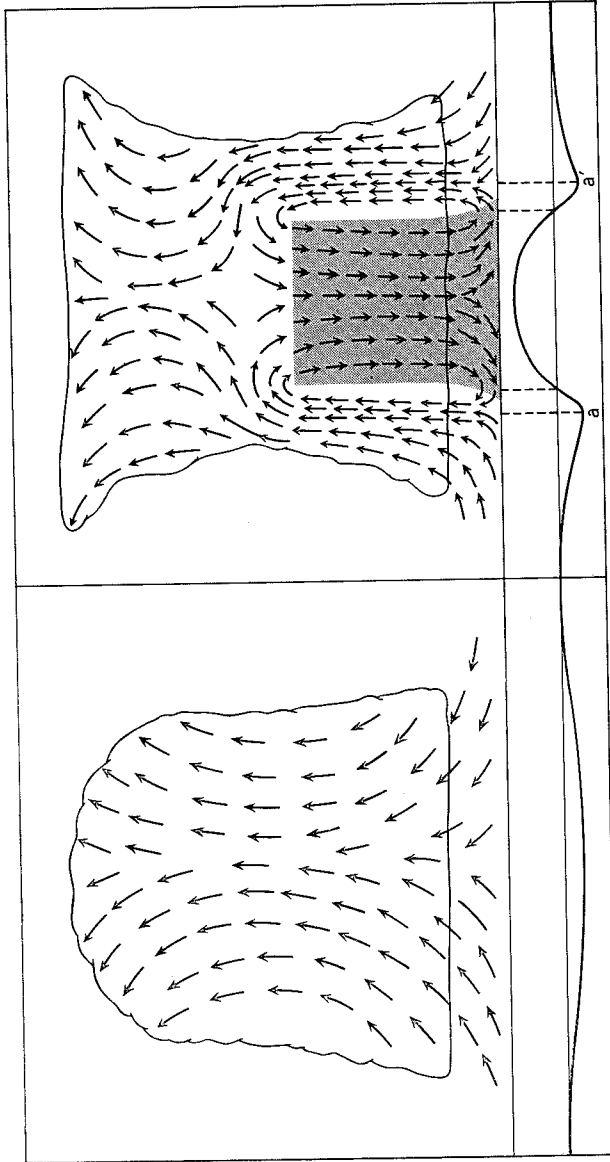
Tegenover het voordeel van zijn eenvoud heeft deze theorie het ons inziens beslissende bezwaar, dat de meeste hozen een veel langere levensduur hebben dan overeenkomt met het geringe aantal minuten, dat zo'n pakket snel kan blijven stijgen. Immers, Koschmieder beroept zich op de zeer grote stijgwinden (ca 25 m/sec), die door zweefvliegers wel in cumulonimbi zijn waargenomen. Een luchtpakket met een dergelijke gemiddelde stijgsnelheid heeft echter na 8 min. reeds een afstand van 12 km vanaf de inversielaag afgelegd. Dit stemt slecht overeen met het gemiddelde van ca 25 min., dat uit de door Wegener samengestelde statistiek van levensduren van Europese hozen²⁴⁾ volgt. Van de 53 hozen met bekende levensduur duurden 18 een half uur of langer, 6 een heel uur of langer. Er zijn ook vele beschrijvingen van tornado's die een uur of langer werkzaam bleven. Hoe kan een luchtpakket al die tijd snel blijven doorstijgen?

Een tweede bezwaar is, dat ook in deze theorie de onmiskenbare voorkeur van de hoos voor neerslaggevende cumulonimbi niet tot uiting komt. In de volgende bijzondere vorm van de thermo-dynamische theorie, namelijk

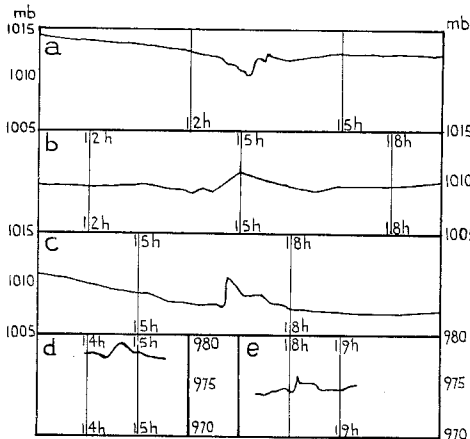
4523 *De theorie van Bleeker en Delver* (1951)⁷²), wordt aan dit kenmerk een wezenlijke betekenis toegedacht. Deze theorie is gegrond op de nieuwere voornamelijk uit de waarnemingen van het Amerikaanse Thunderstorm Project (1946 en '47) gewonnen inzichten omtrent de stroming en drukverdeling in en om convectieve wolken (stapelwolken). Uit bovenbedoelde waarnemingen is namelijk het volgende komen vast te staan^{70, 73}).

Een convectieve wolk bestaat uit één of meer convectiecellen. Ieder van deze cellen doorloopt, althans in geval van volledige ontwikkeling, achtereenvolgens het cumulus- of jeugd stadium, het volwassen stadium en het ouderdoms stadium. Het laatste is voor ons van weinig belang. In het cumulus stadium is de cel gekenmerkt door condensatie zonder neerslagvorming, en uitsluitend opwaartse beweging. Het eenvoudige druk- en circulatiesysteem – figuur 35 links – beantwoordt in principe geheel aan dat op blz. 56 beschreven. De convergentie langs de grond is waarneembaar, maar weinig opvallend. De hele ontwikkeling vertoont in dit stadium nog niet die heftigheid die voor echte hoosituaties zo kenmerkend is.

Dit wordt anders zodra de cumulus door de vorming van neerslag in een cumulonimbus overgaat en hiermee in het volwassen stadium is getreden. Deze neerslag namelijk zal bij zijn val door lager gelegen en dus warmere lucht in en onder de wolk deze lucht afkoelen, welke afkoeling mogelijk nog door verdamping van de neerslagelementen versterkt wordt. Door de afkoeling van de lucht in de neerslagkolom in het hart van de convectiecel ontstaat een ingrijpende wijziging in het druk- en circulatiesysteem. De afgekoelde lucht krimpt namelijk in, hetgeen inhoudt, dat aan de bovenkant er van lucht zal toestromen uit de omliggende wolkgedeelten, die niet door neerslag zijn afgekoeld. Deze horizontale luchtverplaatsingen boven in de wolk weerspiegelen zich in een verandering in de drukverdeling aan de grond: over het afgekoelde gebied stijgt de druk, in het gebied onmiddellijk daaraan grenzend wordt de druk nog lager dan hij al was; hier ontstaat een diepe vore. In geval van een volkomen symmetrische ontwikkeling van de cel vertoont het drukpatroon aan de grond dus een rond gebied van hoge druk (het zogenaamde neerslaghoog, dat op een barogram als onweersneus tot uiting komt) omgeven door een ringvormige



Figuur 35. Schematische voorstelling van de stroming in een convectiecel en van het verloop van de druk aan de grond. Links: nog zonder neerslag (cumulus-stadium). Rechts: met neerslag (volwassen stadium). a - a' is het neerslaghoog, dat door de barograaf als een onweersneus wordt geregistreerd.



Figuur 36. Losse voorbeelden van onweersneuzen, opgenomen tijdens buien waarbij geen hozen optraden.

- a. De Bilt, 21 VII 1950
- b. „ „ , 16 VII 1949
- c. „ „ , 8 VI 1946
- d. Wilmington, Ohio
14 VIII 1947, overgenomen uit 82)
- e. Wilmington, Ohio
14 VII 1947, overgenomen uit 82)

De laatste drie gevallen hebben betrekking op lijnbuien. Men lette in het bijzonder op de vore van lage druk, die vooral aan de voorkant van de onweersneuzen waarneembaar is.

vore van lage druk. Vooral aan de neerslagzijde van deze vore zijn de drukgradiënten enorm*, waardoor de lucht met grote snelheid naar de vore stroomt. Tevens zetten zich verticale vereveningsstromingen in: de koude zware lucht in de neerslagkolom beweegt zich naar beneden terwijl de lucht boven de vore er naast met verhoogde snelheid naar boven stroomt. Er ontwikkelt zich dus in dit stadium onder in het oorspronkelijk circulatiesysteem een tweede, met tegengesteld gerichte circulatie, die in hoofdzaak door de afkoelende werking van de neerslag wordt in stand gehouden; de wrijving door de vallende druppels op de lucht uitgeoefend helpt nog een handje mee**.

Trekt zo'n systeem – figuur 35 rechts – van links naar rechts over de waarnemer heen, dan zullen zich bij de passage van a' een aantal verschijnselen voordoen die sterk aan een koufront doen denken. De daling van de barometer gaat abrupt in een stijging over. De wind draait plotseling (soms 180°) en neemt sterk in kracht toe; hevige rukwinden kunnen zich aan de voorkant van het neerslaghoog voor-

* Williams⁶⁹⁾ mat hier bij lijnbuien gradiënten van 1,3 mb/km. Van de grootte hiervan krijgt men een indruk, door te bedenken, dat, indien een gradiënt van deze grootte overal in dezelfde richting in een uitgestrekt veld op onze geografische breedte zou heersen, hij de lucht tenslotte een snelheid van ca 940 m/sec of ca 3400 km/h zou bezorgen.

** De werking van de neerslag op de omringende lucht is vergelijkbaar met die van de druppels waarin het water van sommige watervallen zich verdeelt. Zoals bekend brengen deze in vele gevallen een krachtige koude daalwind teweeg.

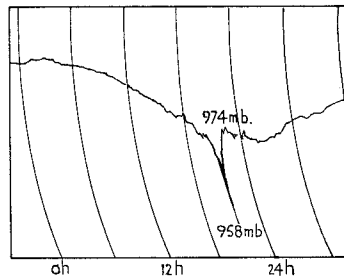
doen. Ook de uitgesproken horizontale convergentie en bijbehorende opwaartse stroming doen aan een front denken, evenals het plotseling stijgen van de relatieve vochtigheid en het vallen van de temperatuur. Op grond van deze overeenkomsten heeft het zin de as van deze vore met de naam microfront aan te duiden.

Volgens de nieuwe hoostheorie nu is het dit microfront waarin zich hozen kunnen ontwikkelen *. De omstandigheden zijn hier gunstig: sterke convergentie en een zeer krachtige opwaartse stroming zijn aanwezig. Door allerlei oorzaken, zoals bijvoorbeeld de ongelijkmatige verwarming van het aardoppervlak, doet zich de in de aanvang voorlopig onderstelde symmetrische opbouw in werkelijkheid natuurlijk niet voor; dit brengt onder meer met zich mee, dat in de vore plaatse-lijk luchtdrukminima zullen voorkomen, die men met de naam microdepressies kan betitelen, en waarheen de convergentie en waarboven de opwaartse stroming zich zullen concentreren. Is nu nog voldoende horizontale aanvangsrotatie in de langs het aardoppervlak toestromende warme en koude lucht voorhanden **, dan zal zich boven zo'n minimum op de bekende wijze een hoos kunnen vormen. Hiermee is een verklaring geleverd voor het feit, dat behoorlijk ontwikkelde hozen zich uitsluitend aan cumulonimbi vormen, met een uitgesproken voorkeur voor de zone aan de buitenkant van een neerslaggebied.

Als deze opvatting juist is ontstaan hozen dus toch weer in een horizontale windsprongzone, zij het dan, dat de betrokken winden niet eenvoudig langs elkaar glijden, doch in hoofdzaak convergeren. Meest-

Figuur 37. Barogram, opgenomen te Minneapolis, Minnesota, U.S.A., tijdens het voorbijtrekken van een zware tornado op 20 VII 1951. Tijdens het drukminimum passeerde de kern op ongeveer 600 m afstand, terwijl op het station een maximum windstoot van 41 m/sec werd gemeten. Men ziet dat het drukminimum onmiddellijk door een onweersneus wordt gevolgd.

(Overgenomen uit 45)



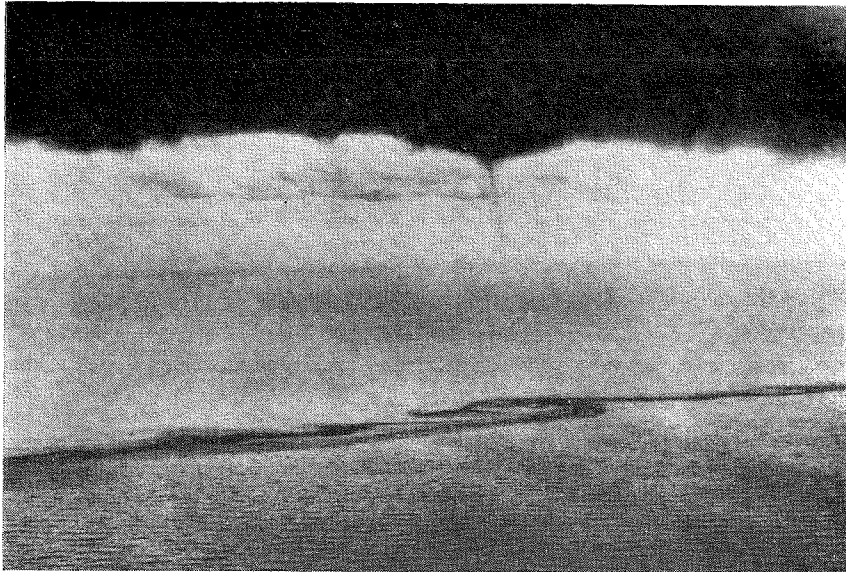
* Deze gedachte is het eerst geopperd door Bleeker en Andre in „Convective phenomena in the atmosphere”, Research report of the University of Chicago, Dep. of Met. (1949, niet gepubliceerd.)

** Uit de micro-analyses van Williams⁶⁹⁾ van buienlijnen, blijkt dat aan de voorkant van de uitstromende koude lucht inderdaad een zeer grote (hier cyclonale) rotatie kan heersen.

al is de zone nog te breed om de ongeoeffende waarnemer op te vallen; boven een wateroppervlak is hij echter bij voldoende ooghoogte soms gemakkelijk aan de golven te onderkennen. Zo beschrijft Defant⁷⁴), na twee dicht bij elkaar gelegen onweersbuien vermeld te hebben, hoe daartussen twee waterhozen ontstonden: „ Op de plaats, waar de waterhozen zich vormden, waren duidelijk aan de schuimende golfslag twee tegengesteld gerichte windrichtingen waar te nemen; zeer mooi kon men zien, hoe de golven elkaar kruisten en het water daardoor over grote afstand als in kokende toestand geraakte. Op eens begon zich aan de oppervlakte van het meer een kleine wervel te ontwikkelen, die steeds heftiger werd en die een tweede, die zich niet ver daar vandaan gevormd had, in zich opnam Het water spatte naar alle kanten uit elkaar, terwijl binnen in de huizenhoge wervel, die duidelijk de vorm van een trechter aannam, het water steeds hoger

Figuur 38. Luchtfoto van een gedeelte van de windsprongzone onder een cumulonimbus in de golf van Tonkin, 8 VIII 1948. Duidelijk is te zien hoe een wervel, die zich aan het wateroppervlak in deze zone vormt, samenhangt met een zich ontwikkelende slurf er boven. In dezelfde zone zijn nog andere wervels in verschillende stadia van wording zichtbaar, die ieder voor zich mogelijk eveneens tot het ontstaan van een slurf kunnen leiden.

Official U.S. Navy photograph.



steeg Steeds duidelijk waarneembaar waren op de plaats waar de wervel ontstaan was de tegengesteld gerichte luchtstromingen, die wellicht aan de grens van de bijna tegen elkaar in trekkende onweersbuien heersten" Een andere beschrijving, die betrekking heeft op een aantal waterhozen gezien vanuit Antibes over de Middellandse Zee⁷⁵) besluit met: „Vier van zulke hozen trokken zo op 1, 2 en 3 km afstand van ons over de zee. Ze trokken langs dezelfde lijn, en deze lijn was klaarblijkelijk de grenslijn van twee tegengesteld gerichte winden." Een mooi voorbeeld geeft tenslotte figuur 38, een aan de Marine Observer⁷⁶) ontleende luchtfoto van een windsprongzone onder een cumulonimbus.

Hozen treden vaak met meer dan één tegelijkertijd onder dezelfde cumulonimbus op, een merkwaardigheid, die met de nieuwe theorie gemakkelijk is te verklaren. Het is immers geenszins uitgesloten, dat, door complicaties in de neerslagverdeling, de vore van lage druk op meer dan één plaats tot een relatief minimum uitdiept, en boven elk van deze minima kan een hoos ontstaan. Deze mogelijkheid wordt eveneens door figuur 38 aangeduid. In de convergentiezone zijn nog meer wervels in verschillende ontwikkelingsstadia waarneembaar.

Dat zeer krachtige hozen meestal met zware hagelbuien op korte afstand gepaard gaan^{83, 84}), is in overeenstemming met het feit, dat de intensiteit van het verticale circulatiesysteem waaruit de hoos ontstaat in hoofdzaak van de lage temperatuur van de vallende neerslag afhankelijk is.

Uit de waarnemingen van het Thunderstorm Project is gebleken, dat de tijden gedurende welke de cellen zware tot matige neerslag leveren variëren van een paar minuten tot bijna een uur. Deze tijden zijn van dezelfde grootte-orde als de levensduur van hozen en tornado's.

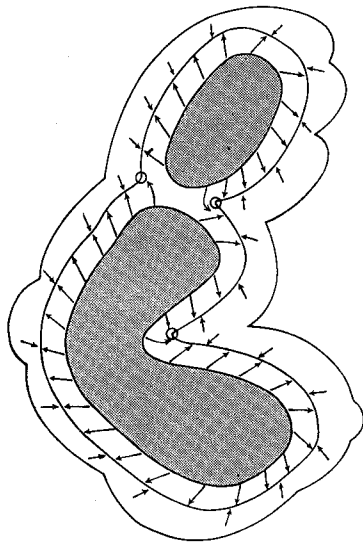
Het – overigens zeer geringe – gedeelte der hozen, dat wordt waargenomen vóórdat ergens neerslag uit de wolk valt, behoeft niet met de theorie in tegenspraak te zijn. Bleeker en Andre⁶⁷), die met behulp van een dichtmazig waarnemingsnet de veranderingen van de luchtdruk aan de grond onder zich ontwikkelende stapelwolken volgden, stelden vast, dat de vorming van het neerslaghoog en de uitdieping van de bijbehorende vore reeds ongeveer 15 minuten vóór dat de eerste neerslag de grond bereikt vrij plotseling inzet, waarschijnlijk op het ogenblik, dat deze neerslag zich op grotere hoogte juist heeft gevormd en zijn afkoelende werking heeft aangevangen. Vanaf dit ogenblik is de ontwikkeling van een hoos mogelijk.

Dat hozen, waargenomen aan de voorkant van buienlijnen (meestal langs of vóór koufronten), in het algemeen van meer energie blijk

geven (tornado's!) dan die welke aan afzonderlijke buien voorkomen, is voor een deel een gevolg van het feit, dat aan de voorkant van deze buienlijnen het microfront meestal krachtiger ontwikkeld is dan bij geïsoleerde buien het geval is. Bij de laatsten immers stroomt de uitvloeiende koude lucht langs de grond in alle richtingen uit, waardoor het microfront snel verzwakt; bij de eersten daarentegen kan de koude lucht vrijwel alleen in voor- en achterwaartse richting uitvloeien.

Ten aanzien van dergelijke *bewegende* systemen moet nog opgemerkt worden, dat de koude lucht aan de achterkant de neiging heeft tegen het aardoppervlak te blijven plakken. De vore blijft hierdoor wat achter en alle overgangen zijn veel vager. Voor het gebruik van de term „microfront” is aan de *achterkant* van het neerslaghoog dan ook nauwelijks aanleiding. Zeer zware hozen zal men derhalve waarschijnlijk overwegend aan de *voorkant* van het neerslaggebied aantreffen. Dit punt verdient bij toekomstige waarnemingen nadere aandacht.

Is een zeker neerslagpatroon – bijvoorbeeld als in figuur 39 – gegeven, dan kan men zich de vraag stellen op welke plaatsen in de vore men het ontstaan van microdepressies – dus eventueel de vorming van hozen – in het bijzonder mag verwachten. Het is duidelijk, dat dit daar zal zijn, waar de lucht aan meer dan één zijde door vallende neerslag wordt afgekoeld, dus in de „toppen” van de vore tussen twee neerslag-



Figuur 39. Schematisch bovenaanzicht van een cumulonimbus met donker aangegeven neerslaggebieden, as van de vore van lage druk en wolkenontrek. De plaatsen waar de voren vermoedelijk een minimum zal vertonen en waar dus de kans op de vorming van een hoos het grootst is, zijn met een cirkeltje aangeduid. De afwijking van de wind naar rechts is iets overdreven voorgesteld.

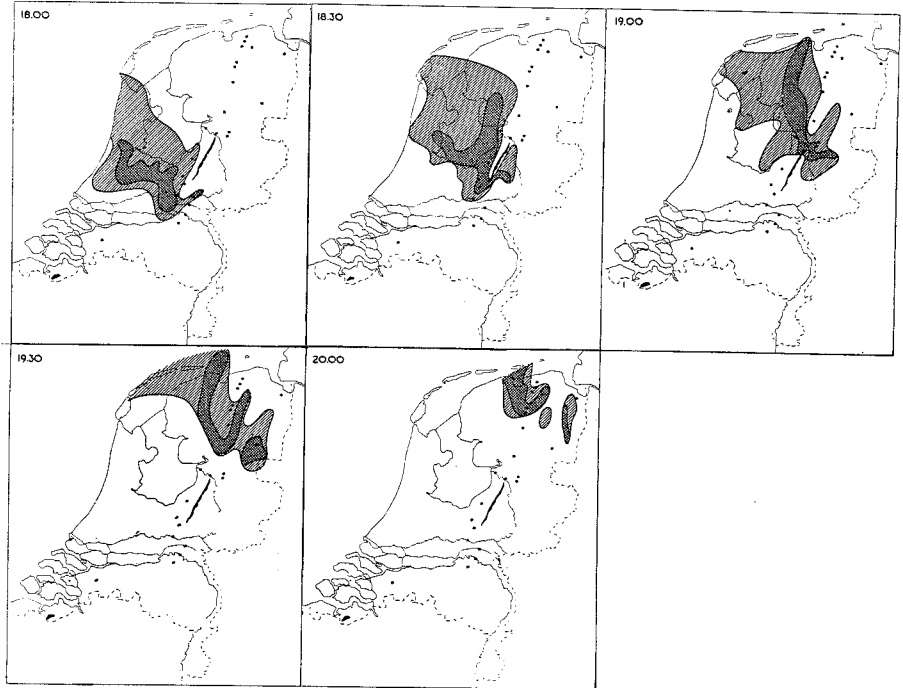
gebieden, of in een inham in één neerslaggebied. In deze punten zullen zich het drukverschil met de omgeving, de convergentie en de opwaartse stroming extra sterk ontwikkelen, en bestaat dus ook de grootste kans op de vorming van een hoos. Buienlijnen, met hun ingewikkelde neerslagverdeling, zijn ook om deze reden gunstiger voor het optreden van krachtige hozen dan afzonderlijke cumulonimbi, vooral indien deze laatste maar één neerslaggebied bevatten.

Geheel met bovenstaande in overeenstemming zijn de gevonden 12 gevallen van hozen, waarvan uit de beschrijving bleek, dat deze zich tussen twee neerslaggebieden in bevonden. Deze hozen waren over 't algemeen bijzonder krachtig (zie 343). Ook de reeds eerder aangehaalde beschrijving van de Amerikaanse tornadokenner Humphreys, volgens welke het aan weerskanten voorkomen van een neerslaggebied een kenmerkend onderdeel van bij tornado's voorkomende situaties schijnt te zijn, is met bovenstaande in overeenstemming, evenals de beschrijvingen van de oudere onderzoekers Finley⁷⁷) („twee wolken, de ene uit het noordwesten, de andere uit het zuidwesten, schenen elkaar te ontmoeten”) en Henry⁷⁸) („plaatselijke tekenen van de nadering van een tornado zijn dreigende wolken, eerst in het zuidwesten, dan bijna onmiddellijk in het noordwesten en noorden”). Tenslotte wijzen we op de hevige hozen van 23 VIII 1950 over Nederland²⁷), welke, naar uit talrijke neerslagwaarnemingen kon worden vastgesteld, zich in inhammen in het neerslaggebied bevonden – figuur 40.

45231 De verticale circulatie in het licht van de nieuwe vorm van de thermo-dynamische theorie.

Op blz. 58 hebben wij de krachtige opwaartse stroming als een belangrijke voorwaarde voor het ontstaan van een hoos leren kennen. In verband met het gewicht van dit punt is het wel gewenst nog even in te gaan op het door vroegere onderzoekers wel tegen de thermo-dynamische theorie aangevoerde bezwaar, volgens hetwelk de uit de adiabatische afkoeling voortvloeiende lage temperatuur van de lucht onder in de hoos in strijd zou zijn met de hoge temperatuur, die de lucht zou moeten hebben om te kunnen opstijgen.

Hier kan men allereerst tegen inbrengen, dat het uiteindelijk om horizontale verschillen in *luchtdichtheid* en niet om die in temperatuur gaat, wat bij de grote horizontale drukverschillen, die in een hoos voorkomen, niet op het zelfde neer komt. Indien men er van uit gaat, dat de toestroming van de lucht naar de hoos inderdaad droog-adiaba-



Figuur 40. Verplaatsing van het met de hevige hozen van 20 VIII 1950 samenhangende neerslaggebied, bepaald met behulp van gegevens verstrekt door vrijwillige onweerswaarnemers. In het zwaar geschaduwde gebied valt zware tot zeer zware neerslag, in het licht geschaduwde gebied matige neerslag. De op sommige plaatsen buiten dit gebied nog vallende lichte neerslag is buiten beschouwing gelaten. De plaatsen waar schade is aangericht, zijn zwart aangegeven. Uit de vorm van het neerslaggebied, samen met de mededelingen van vele ooggetuigen, volgens welke de hoos zowel op de Veluwe als in het noorden van het land aan de neerslag onmiddellijk voorafging, blijkt, dat de hoos zich steeds in een inham van het neerslaggebied bevonden moet hebben.

Cliché welwillend afgestaan door Wolters, Groningen.

tisch geschiedt (wat in werkelijkheid niet het geval is), dan is de temperatuur van deze toegestroomde lucht wel is waar lager dan die in de omgeving, maar daar dit in nog belangrijker mate ook met de luchtdruk het geval is, is toch ook de luchtdichtheid er lager dan in de omgeving (de lucht is immers *adiabatisch uitgezet!*), zodat er geen reden is waarom de lucht niet zou kunnen opstijgen.

Hier komt nog bij, dat de in werkelijkheid optredende afwijkingen

van de onderstelde droog-adiabatische toestroming nog tot een versterking van de horizontale dichtheidsverschillen leiden. In de slurf van de hoos immers komt condensatiewarmte vrij, terwijl de lucht in de omgeving door vallende neerslag wordt afgekoeld.

Tenslotte zijn er nog twee mechanische factoren, die tot de verticale circulatie bijdragen. Dit zijn de wrijving van de lucht langs het aardoppervlak en de wrijving, die door de vallende neerslag op de lucht in de omgeving van de hoos wordt uitgeoefend.

Van deze factoren treden sommige, namelijk de zeer lage druk in de kern van de hoos, de vrijkomende condensatiewarmte in de slurf, en de wrijvingsconvergentie langs de grond pas in werking als het systeem reeds in staat van wording is. Het is dan ook slechts de in de nabijheid vallende *neerslag*, die, via de afkoelende werking en de wrijving op de lucht in de omgeving van de hoos uitgeoefend, als *eerste oorzaak* van de voor de hoos verantwoordelijke verticale circulatie moet worden beschouwd.

45232 Slotopmerkingen

Het is bekend, dat eenmaal gevormde hozen de wonderlijkste eigenaardigheden kunnen gaan vertonen. Men heeft bijvoorbeeld eens waargenomen, dat twee dicht naast elkaar draaiende hozen de voeten „in elkaar staken” en als één van de wolk neerhangende guirlande nog enige tijd doordraaiden⁸⁰⁾. Een andere waarnemer⁸¹⁾ verhaalt van een slurf waarin een klink ontstaat. Een enkele maal wordt de slurf zodanig scheef getrokken, dat een gedeelte min of meer horizontaal verloopt. Soms verheft de voet van een hoos zich gedurende de voortbeweging tijdelijk van de grond, in welk geval het aan de grond getrokken spoor leemten vertoont. Vooral boven heuvelachtig terrein doet zich dit verschijnsel voor. Een heel enkele maal graaft een hoos plaatselijk een kuil of vore in de grond³¹⁾. Al deze bij gewone hozen soms optredende merkwaardigheden, alsmede de bij de proeven van Vettin en bij de brandhozen van San Louis Obispo gebleken mogelijkheid, dat de verwekte wervels zich, indien losgemaakt van hun energiebron, nog enige tijd handhaven, geven de indruk, dat een wervel, indien eenmaal gevormd, een min of meer zelfstandig leven kan gaan leiden. Er zij op gewezen, dat de laatstbehandelde theorie slechts een *ontstaanstheorie* is, die zich derhalve over de hier bedoelde eigenaardigheden niet uitsprekt.

Hoewel in hoositaties de meeste schade door de eigenlijke hoos wordt veroorzaakt, kunnen soms ook aanzienlijke verwoestingen wor-

den aangericht door de uit het neerslaghoog waaierende rukwinden zonder wervelkarakter. Vooral aan de voorkant van buienlijnen kan dit het geval zijn. Volgens de laatstbehandelde theorie echter is een hoos geen op zich zelf staande storing, maar een deel van deze rukwindenzone, waarin hij geleidelijk overgaat. De Veluwehoos van 1950 bevestigde deze gevolgtrekking. Dit brengt met zich mee, dat het in overgangsgevallen onmogelijk is om vast te stellen of schade door harde wind zonder hooskarakter dan wel door een hoos is veroorzaakt. Het Amerikaanse voorbeeld om in verzekeringspolissen alle windschade over één kam te scheren, verdient dan ook zeker navolging.

De vraag doet zich voor, of de laatste theorie enig uitzicht biedt op de mogelijkheid, windhozen te voorspellen.

In de U.S.A. hebben Fawbush, Miller en Starrett⁷⁹⁾ door studie van synoptische situaties, waarin tornado's zich ontwikkelen, criteria voor de vorming er van vastgesteld, op grond waarvan zij sedertdien verwachtingen opstellen en uitgeven omtrent het al of niet optreden van tornado's. De criteria hebben betrekking op vochtigheid, stabiliteit, hoogtewind en optilling. De bewering van Fawbush c.s., dat de verwachtingen tot dusverre succes hebben, moet gezien worden in het licht van het feit, dat zij betrekking hebben op een gebied, dat zeer groot is ten opzichte van het oppervlak, dat werkelijk door de tornado zal worden getroffen. De auteurs doen geen mededeling omtrent de juiste grootte van hun verwachtingsgebied, maar uit de beschrijving van Flora⁸⁵⁾ krijgt men de indruk, dat deze ruwweg 25 000 km² moet zijn. Het oppervlak dat door één tornado wordt geteisterd is volgens Brooks⁸³⁾ gemiddeld slechts 1.5 km². De voorspelling van het optreden van een tornado voor een dergelijk gebied geeft een inwoner in het ergste geval – dat zich voordoet als de voorspelling bewaarheid wordt – een kans van ca 1 op 16 000 om getroffen te worden. Zelfs indien men in aanmerking neemt, dat zich meer dan één tornado kan voordoen, blijft de kans, dat een bepaald punt getroffen zal worden nog uiterst klein. Dit neemt niet weg, dat zulke verwachtingen nuttig kunnen zijn voor ziekenhuizen, elektrische centrales en andere installingen, die met de gevolgen van tornado's in wijde omtrek in aanraking kunnen komen.

Voor het gewone publiek zal echter een voorspelling alleen dan zin hebben, indien deze een redelijke zekerheid geeft dat men, op de plaats waar men zich bevindt, ook werkelijk zal worden getroffen. Of men echter ooit dergelijke voorspellingen zal kunnen doen moet in twijfel worden getrokken. Immers, de noodzakelijke en voldoende voorwaar-

den zijn, volgens de laatstbehandelde theorie, krachtige opwaartse stroming en horizontale aanvangsrotatie. Aan de eerste voorwaarde wordt voldaan indien zich krachtige buien vormen. Deze kan men tot dusverre slechts zeer in 't algemeen voorspellen; waar de afzonderlijke buien zich zullen bevinden en waar het neerslagpatroon aanleiding zal geven tot bijzonder krachtige stijgwinden is niet te voorzien. Voor de horizontale aanvangsrotatie geldt hetzelfde. Kortom, windhozen vormen zich door een samenspel van bijzonderheden op een schaal, die zo klein is ten opzichte van de mazen in het gebruikelijke synoptische waarnemingsnet, dat deze bijzonderheden niet eens kunnen worden waargenomen als ze zich reeds voordoen, laat staan voorspeld kunnen worden.

Iets geheel anders is natuurlijk het voorspellen van het overtrekken van een hoos, nadat men de ontwikkeling er van reeds heeft opgemerkt, en de koers heeft vastgesteld. Een op deze wijze werkend waarschuwingssysteem voor de bevolkingscentra van het Midden-Westen der U.S. functioneert al sinds 1942. Een groot aantal vrijwillige waarnemers werkt hieraan mee; radar wordt gebruikt om de neerslaggebieden snel te localiseren.

De Europese hozen zijn waarschijnlijk veel te zeldzaam, te kort van duur en over 't algemeen ook te onschuldig van aard om een overeenkomstige organisatie zinvol te doen zijn.

Tenslotte danken wij prof. dr. W. Bleeker voor critische op- en aanmerkingen en voor de tot het verkrijgen van het fotomateriaal verleende bemiddeling, alsmede de heren A. H. Hildebrand en H. Dekker voor het verzorgen van het tekenwerk.

Litteratuur


- 1 M. Lemons „Some meteorological aspects of Nebraska tornadoes”. Mon. Wea. Rev., 66, p 206, 1938.
- 2 W. J. Humphreys „The tornado and its cause”. Mon. Wea. Rev., nadoes”. Mon. Wea Rev., 66, p 206, 1938.
- 3 W. E. Hurd „Waterspouts”. Pilot Chart of the South Atlantic Ocean, Sept., Oct., Nov., 1947.
- 4 J. E. Hissong „Whirlwinds at oil-tank fire, San Louis Obispo, California”. Mon. Wea. Rev., 54, p 161, 1926.
- 5 Anonymus „The great earthquake in Japan”. Meteor. Mag., 58, p 247, 1923.
- 6 F. Vettin „Ueber den aufsteigenden Luftstrom, die Entstehung des Hagels und der Wirbelstürme”. Ann. der Physik und Chemie, 102, p 246, 1857.
- 7 E. Mascart „Experiences de M. Weyer sur les tourbillons, trombes, tempêtes et sfères tournantes”. Journal de Physique, p 557, 1889.
- 8 J. Letzmann „Experimentelle Untersuchungen an Luftwirbeln”. Gerlands Beitr. zur Geoph., 2, p 130, 1931.
- 9 W. H. Dines „Experiment showing the formation of the tornado cloud”. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 22, p 71, 1896.
- 10 M. Pinkhof „Nog steeds windhozen”. Hemel en Dampkring, 25, p 315, 1927.
- 11 Anonymus „Waterspouts”. Marine Observer, 6, p 126, 1929.
- 12 J. Letzmann „Eine Trombenbildung in schwach bewegter Luft”. Ann. der Hydrographie, 57, p 385, 1929.
- 13 H. Markgraf „Drei Trombenberichte”. Ann. der Hydrographie, 57, p 14, 1929.
- 14 Anonymus „Waterspout” Marine Observer, 3, p 189, 1926.
- 15 T. H. Applegate „Waterspout seen near Cattewater”. Meteor. Mag., 63, p 236, 1928.
- 16 M. Pinkhof „Windhoos boven de Zuiderzee”. Hemel en Dampkring, 26, p 290, 1928.

- 17 Onweders en Optische verschijnselen in Nederland, 41, 1940.
- 18 R. M. Williamson „Tornado at Nashville, Tenn., on March 14, 1933”. Mon. Wea. Rev., 61, p 84, 1933.
- 19 „The South Wales tornado of Oct. 27, 1913”. Geoph. Mem., no. 11, London.
- 20 A. C. Hawkins „A tornado in Georgia”. Bull. Amer. meteor. Soc., 20, p 52, 1939.
- 21 W. J. Humphreys „The tornado”. Mon. Wea. Rev., 54, p 501, 1926.
- 22 Anonymus „Waterspout”. Marine Observer, 14, p 12, 1937.
- 23 Anonymus „Waterspouts”. Marine Observer, 3, p 189, 1926.
- 24 A. Wegener „Wind- und Wasserhosen in Europa”. Brunswijk 1917.
- 25 E. Pieker „Eine Wasserhose bei Helgoland”. Zeitschr. für angew. Meteor., 54, p 48, 1937.
- 26 A. Wegener „Beiträge zur Mechanik der Tromben und Tornados”. Meteor. Z., 45, p 201, 1928.
- 27 A. Delver „De windhozen van 23 Augustus 1950”. Hemel en Dampkring, 49, p 121, 1951.
- 28 Anonymus „Waterspout”. Marine Observer, 8, p 168, 1931.
- 29 E. van Everdingen Jr „De cycloonachtige windhozen van 10 Augustus 1925”. Verslag van de Kon. Akad. v. Wetensch., afd. Natuurk., 34, p 853, 1925.
- 30 R. G. Veryard „A preliminary study of a tornado at Peshawar”. Scient. Notes Ind. Meteor. Dep., 5, p 109, 1935.
- 31 A. A. Justice „Seeing the inside of a tornado”. Mon. Wea. Rev., 58, p 205, 1930.
- 32 Anonymus „Waterspouts”. Marine Observer, 16, p 52, 1939.
- 33 A. Ashenberger „Two waterspouts in Mobile Bay, June 12, 1925”. Mon. Wea. Rev., 53, p 309, 1925.
- 34 W. E. Hurd „Waterspout on Hillsborough Bay, Tampa, Florida, April 2, 1929”. Mon. Wea. Rev., 57, p 249, 1929.
- 35 A. Wegener „Kleintromben auf See”. Ann. der Hydrographie, 47, p 282, 1919.

- 36 F. H. Bigelow „The meteorological conditions associated with the Cottage City Waterspout”. *Mon. Wea. Rev.*, 34, p 360, 1906.
- 37 E. M. Brooks „Several cloud spouts”. *Mon. Wea. Rev.*, 59, p 482, 1931.
- 38 Anonymus „Waterspouts”. *Marine Observer*, 9, p 75, 1932.
- 39 Anonymus „Waterspout”. *Marine Observer*, 2, p 92, 1925.
- 40 P. L. Mercanton „Les trombes de 9 août 1945 sur les lacs Lemane et de Neuchatel”. *Bull. Soc. Vaud.*, 63, p 207, 1946.
- 41 H. Koschmieder „Ueber Tromben”. *Wiss. Abh. Reichsamt für Wetterdienst*, 6, no. 3, 1940.
- 42 T. S. Outram „Storm of August 20, 1904, in Minnesota”. *Mon. Wea. Rev.*, 32, p 365, 1904.
- 43 J. Baier „Low pressure in St Louis tornado”. *Mon. Wea. Rev.*, 24, p 332, 1896.
- 44 C. Bois „Les trombes en Tunisie”. *Revue pour l'étude des calamités*, 10, p 22, 1947.
- 45 M. R. Hovde „The Hennepin County tornado of July 20, 1951”. *Weatherwise*, 5, p 60, 1952.
- 46 Anonymus „Floods and tornadoes mark early spring”. *Weatherwise*, 5, p 63, 1952.
- 47 W. E. Hurd „The Virginia-district of Columbia-Maryland tornado of November 17, 1927”. *Mon. Wea. Rev.*, 55, p 499, 1927.
- 48 A. J. Henry „The tornadoes of March 18, 1925”. *Mon. Wea. Rev.*, 53, p 141, 1925.
- 49 Anonymus „Whirlwind”. *Marine Observer*, 8, p 38, 1931.
- 50 Anonymus „Tornado”. *Marine Observer*, 3, p 204, 1926.
- 51 H. E. Graham „A fire-whirlwind of tornadic violence”. *Weatherwise*, 5, p 59, 1952.
- 52 R. Mügge „Zur Entstehung der Tromben”. *Meteor. Z.*, 44, p 411, 1927.
- 53 F. Roszmann „Das Bewegungsgesetz der Wolkentromben”. *Naturwiss. Rundschau*, Heft 8, p 337, 1951.
- 54 F. Roszmann „Ueber Wolkentromben”. *Ann. Meteor.*, 4, Heft 1–6, p 48, 1951.

- 55 A. K. Showalter en J. R. Fulks „Preliminary Report on Tornadoes”. U.S. Weather Bureau, Washington, 1943.
- 56 H. Koschmieder „Die horizontale Trombe von Magdeburg”. Meteor. Z., 54, p 340, 1937.
- 57 M. Pinkhof „De windhoos van Weesperkarspel”. Hemel en Dampkring, 25, p 269, 1927.
- 58 M. Pinkhof „Windhozen op 6 Juni 1934”. Hemel en Dampkring, 32, p 266, 1934.
- 59 Anonymus „Waterspouts between clouds”. Marine Observer, 27, p 127, 1929.
- 60 W. Bleeker „De windhozen van 16 Augustus 1931 te Doetinchem”. Hemel en Dampkring, 29, p 323, 1931.
- 61 M. Pinkhof „Merkwaardige windhozen en hagelval bij Hindelopen op 12 Aug. 1938”. Hemel en Dampkring, 36, p 348, 1938.
- 62 W. J. Humphreys „Physics of the Air”. New York, 1940.
- 63 J. Letzmann „Einige Ergebnisse experimenteller Wirbelforschungen”. Meteor. Z., 50, p 462, 1933.
- 64 F. C. Pate „The tornado at Montgomery, Alabama, Febr. 12, 1945”. Bull. Amer. meteor. Soc., 27, p 462, 1946.
- 65 M. Tepper „A proposed mechanism of squall lines: the pressure jump line”. J. Meteor., 7, p 21, 1950.
- 66 M. Tepper „On the origin of tornadoes”. Bull. Amer. meteor. Soc., 31, p 311, 1950.
- 67 W. Bleeker en M. J. Andre „Convective phenomena in the atmosphere”. J. Meteor., 7, p 195, 1950.
- 68 F. Exner „Ueber die Bildung von Windhosen und Zyklonen”. Sitz. Ber. der Akad. der Wiss. in Wien, Math. naturw. Klasse, Abt. 2a, 1923.
- 69 D. T. Williams „A surface micro study of squall-line thunderstorms”. Mon. Wea. Rev., 76, p 239, 1948.
- 70 H. R. Byers en R. R. Braham „Thunderstorm structure and circulation”. J. Meteor., 5, p 71, 1948.
- 71 H. Koschmieder „Ueber Böen und Tromben”. Die Naturwissenschaften, 33, Oct. 1946.

- 72 W. Bleeker en
A. Delver „Some new ideas on the formation of wind-spouts and tornadoes”. Archiv für Meteor., Serie A, 4, p 220, 1951.
- 73 H. R. Byers,
R. Horace en
E. C. Hull „Inflow patterns of thunderstorms as shown by winds aloft”. Bull. Amer. meteor. Soc., 30, p 90, 1949.
- 74 A. Defant „Wasserhosen auf dem Achensee”. Meteor. Z., 30, p 571, 1913.
- 75 Anonymus „Beobachtung von vier gleichzeitigen Tromben”. Meteor. Z., 10, p 465, 1893.
- 76 „Marine Observer”, 18, p 137, 1948.
- 77 J. P. Finley „Tornadoes”. New York, 1887.
- 78 A. J. Henry „Cyclones, tornadoes, thunderstorms, squalls”. Mon. Wea. Rev., 46, p 24, 1918.
- 79 E. J. Fawbush,
R. C. Miller en
L. G. Starrett „An empirical method of forecasting tornado development”. Bull. Amer. meteor. Soc., 32, p 1, 1951.
- 80 Anonymus „Waterspouts”. Marine Observer, 3, p 155, 1926.
- 81 H. C. Russell „Waterspouts on the coast of New South Wales”. 1898.
- 82 H. R. Byers en
R. R. Braham „The thunderstorm”. Washington D.C., 1949.
- 83 E. M. Brooks „Tornadoes and related phenomena”. In T. F. Malone e.a. Compendium of Meteorology, Boston, Mass., 1951.
- 84 H. T. Harrison „Certain Tornado and Squall Line Features”. United Air Lines Met. Circ. no. 36, Denver, 1952.
- 85 S. D. Flora „Tornadoes of the United States”. Norman, 1953.

 32209 - '54 (6600)



32209 - '54 (6600)