

## HOOKECHO'S, KILLERS EN SPOTTERS

## De anatomie van de windhoos

*Baltus Zwart (KNMI)*

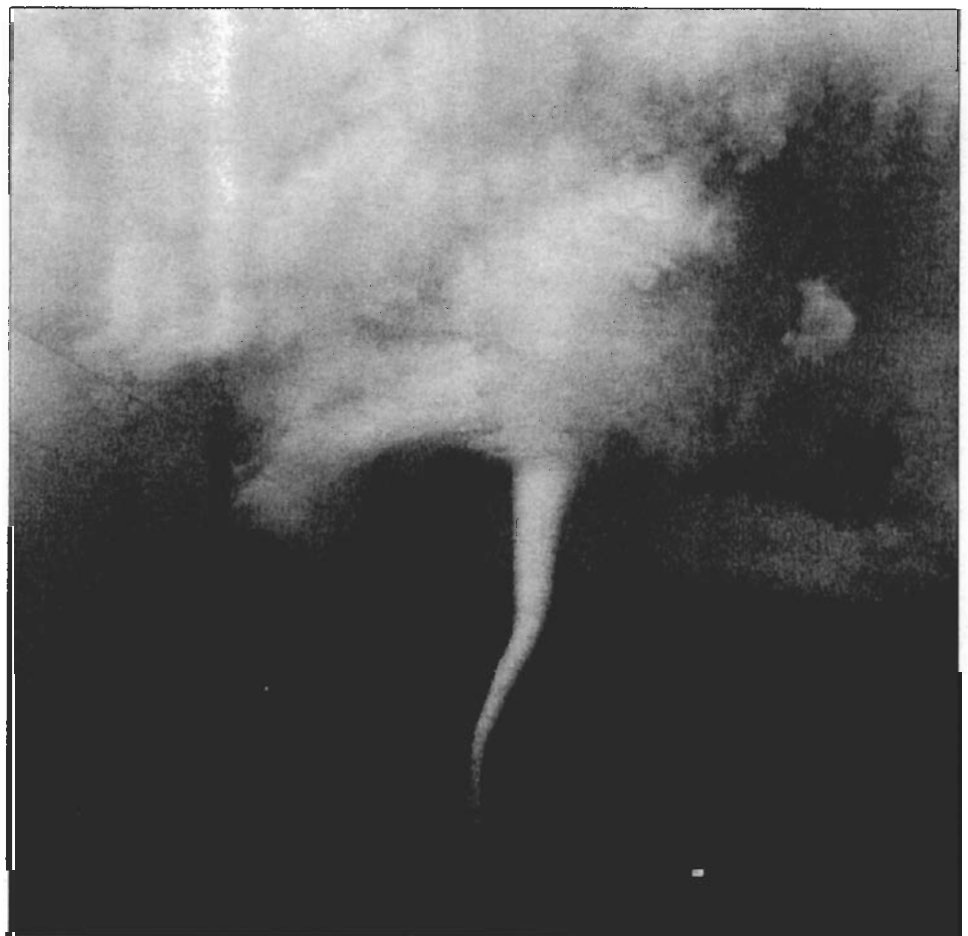
Windhozen kunnen zich in vele vormen en sterkten voordoen, van lange ragdunne buizen tot brede indrukwekkende trechters, van onschuldige stofhoosjes tot zware dood en verderf zaaiende wervels. De buizen en trechters gaan uit van de wolkenbasis, maar soms, als er geen wolk is te zien, lijken ze uit te gaan van het aardoppervlak zoals bij stof- en zandhoosjes. Maar ook in dit geval is een groot deel van de atmosfeer bij het verschijnsel betrokken. De processen die daarin plaatsvinden maken het vliegen door windhoos-producerende buien tot een hachelijke onderneming. Onder de wolkenbasis is het op betrekkelijk korte afstand van de hoosslurf echter redelijk rustig zodat de sportvlieger H.P.M. de Rouw er zonder gevaar vrij dicht langs kon vliegen, zoals in de vorige aflevering van *Meteorologica* was te lezen. De ontmoeting van een vliegtuig met een windhoos kan echter ook desastreus verlopen.

Op 6 oktober 1981 startte de City Hopper PH-CHI, een Fokker Fellow-ship van de NLM om 17.04 uur van de luchthaven Rotterdam voor het uitvoeren van een lijnvlucht naar Hamburg met tussenstop te Eindhoven. Aan boord bevonden zich naast vier leden van de bemanning dertien passagiers. Een brede zone met elektrisch zeer actieve onweersbuien strekte zich op dat uur uit van Gouda via Rotterdam tot voorbij Antwerpen. Om Eindhoven te bereiken moest het vliegtuig dwars door dit buiengebied vliegen. De basis van deze onweersbuien lag op een hoogte van ongeveer 400 m. De vlieghoogte tussen binnenlandse bestemmingen ligt op een hoogte tussen 1000 en 3000 m, voor genoemde vlucht dus in de wolken. Eenmaal in de onweerswolken, dus zonder enig zicht, heeft de bemanning vermoedelijk getracht de felste echo's op de boordradar trachten te ontwijken omdat daar de kans op zware hagelval, ijsafzetting door onderkoelde regendruppels, of sterke onlaaggerichte luchtstromen (downrafts) het grootst is. De laatste zijn er ook nog onder de wolkenbasis, zodat op die hoogte, als het al was toegestaan, zeker niet gevlogen kon worden. Het is dus logisch dat de bemanning koos voor een minder actief gedeelte van de bui (geen of minder radarreflectie) om via dat traject het buiengebied door te vliegen. Voor zo'n afwijking van de vliegroute is toestemming vereist. Die werd verkregen. Tot zover was er niets aan de hand, maar er zat een gevaarlijke adder onder het gras; een neerslagecho, met de vorm van een vishaak, voor het eerst ontdekt in de Verenigde Staten en daar bekend onder de

naam "Hookecho". De Hookecho wijst op de vorming van een gevaarlijk fenomeen in de bui, een windhoos of tornado. De windhoos ontstaat meestal aan de rand van een bui in een gebied waar de neerslagecho veel zwakker is of zelfs geheel ontbreekt. In een poging de gebieden met intensieve neerslag en dalende lucht-

bewegingen te vermijden werd koers gezet naar de plek waar zich juist op dat moment een windhoos ontwikkelde. De krachtige opstijgende luchtstroom, die het centrum van een windhoos kenmerkt, zet zich voort in de wolk. Daar is sprake van een zogeheten schoorsteen, een nauwe koker met een sterke opstijgende luchtstroming, die doorgaat tot in de top van de wolk en die geflankeerd wordt door dalende luchtstromingen. De snelheden van de luchtstroom in de schoorsteen kunnen oplopen van vele tientallen tot honderd meter per seconde. In het grensgebied tussen dalende en stijgende lucht-bewegingen komen uiterst krachtige wervelingen voor (turbulentie). Bij de ontmoeting van deze schoorsteen registreerde de vluchtreorder achtereenvolgens versnellingen van min 2,5, plus 6,8, plus 4,8 en min 3,2 maal de versnelling van de zwaartekracht. De grootste versnelling overtrof met tien procent de maximale sterktespecificatie van de vleugels. De sterk zwiepende beweging van de vleugels had tot gevolg dat de rechter vleugel afbrak en het vliegtuig neerstortte. Geen der inzittenden overleefde het ongeluk.

Voor het ontstaan van zware, vernielende hozen moet een aantal voorwaarden zijn



Een "witte" tornado boven de oneindige vlakken van de "corn belt" in de Verenigde Staten. De sokkel aan de basis van de cumulonimbus vertoont cyclonale draaiing.

vervuld, waaraan boven de uitgestrekte vlakten van het midden van de Verenigde Staten vaker wordt voldaan dan in Europa en nog minder vaak in Nederland. In de V.S. komen gemiddeld per jaar 700 tot 800 windhozen (tornado's) voor, tegen niet meer dan tien tot vijftien in Nederland. De Nederlandse windhozen zijn daarbij belangrijk minder krachtig dan hun Amerikaanse collega's. De windhozen met een sterkte, die daar wel mee zijn te vergelijken komen bij ons niet vaker voor dan eens in de tien jaar. Dat zijn ook de hozen waarbij slachtoffers vallen (zie de tabel).

De meeste windhozen komen in Nederland voor in augustus (gemiddeld twee of drie), in de Verenigde Staten in mei en juni (gemiddeld 140 tot 160). In aanmerking moet worden genomen dat het oppervlak van de Verenigde Staten 265 maal zo groot is als dat van Nederland. De verdeling over de aarde, de mate van voorkomen en de gebondenheid aan een bepaald jaargetijde geeft al aan dat vooral voor het ontstaan van zware windhozen de opbouw van de atmosfeer aan stringente voorwaarden moet voldoen wat betreft de verticale verdeling van de

temperatuur en vochtigheid en de verandering van de wind met de hoogte. Grof gezegd komt het er op neer dat er sprake moet zijn van een grote onstabiele wat betreft de temperatuuroopbouw en een krachtige straalstroom in de hogere luchtlagen. De temperatuuroopbouw moet zodanig zijn dat lucht die na verwarming aan de grond opstijgt (convectie) steeds warmer blijft dan de omringende lucht. In de atmosfeer moet de temperatuur dus sterk met de hoogte afnemen en aan de grond moet de lucht veel waterdamp bevatten omdat stijgende vochtige lucht door condensatie van de waterdamp minder afkoelt dan stijgende droge lucht. Bij een hoeveelheid opstijgende vochtige lucht, die we kunnen opvatten als een vochtige "heteluchtballon" blijft het temperatuurverschil met de omringende lucht tijdens het stijgen groter dan bij het stijgen van een droge "heteluchtballon". Er zijn twee factoren, die het snelle omhoogschieten van de luchtmasse nog kunnen bevorderen: een (zeer) droge bovenlucht en de aanwezigheid van een straalstroom boven het gebied waar de windhozen of tornado's producerende buien ontstaan. Bij het ontstaan van de buien zal de bovenlucht worden opgetild

en die zal vervolgens droogadiabatisch afkoelen met als gevolg dat de atmosfeer in de hogere luchtlagen nog kouder wordt



*De hoos van Tricht (25 juni 1967). Ook deze hoos toont een duidelijke 'sokkel'. De kracht ervan was vergelijkbaar met die van Amerikaanse tornado's.*

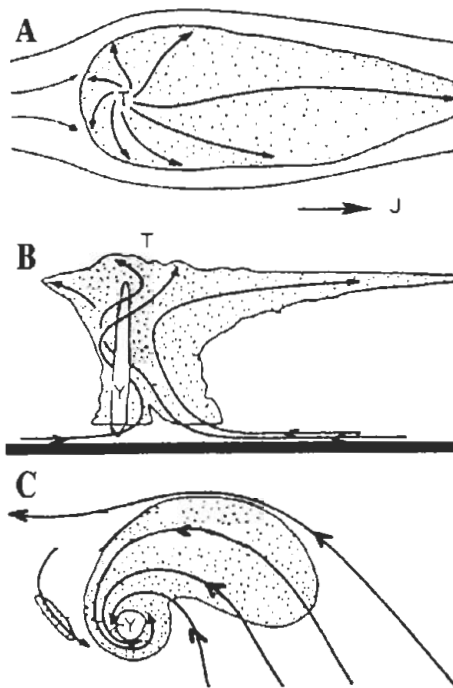


*Schadespoor in een nieuwbouwwijk, veroorzaakt door de hoos van Tricht op 25 juni 1967. (foto Koninklijke Luchtmacht)*

dan hij oorspronkelijk al was. Bij een situatie met droge bovenlucht kan dat deel van de atmosfeer eerst zelfs stabiel van opbouw geweest zijn. Die toestand heet potentiële onstabiele toestand. Deze toestand van de atmosfeer komt bij het ontstaan van zware windhozen en tornado's dikwijls voor. Bij het ontstaan van de zware windhozen (tornado) van Tricht op 25 juni 1967 is dit verschijnsel duidelijk aangetoond. In Nederland zal echter zelden aan deze voorwaarde worden voldaan in tegenstelling tot het gebied van het midden van de Verenigde Staten waar in het voorjaar in de staten Texas, Louisiana, Oklahoma en Kansas warme en vochtige lucht vanuit de Golf van Mexico binnendringt en tegelijkertijd vanuit het westen door de Rocky Mountains droog geföhnde lucht over de vochtige luchtmassa uitvloeit. Als er dan eveneens sprake is van een zuidwest-noordoost verlopende straalstroom in de hogere luchtlagen ontstaat er een ideale situatie voor de vorming van tornado's.

Volgens een onderzoek in de Verenigde Staten is de draairichting van de meeste windhozen (tornado's) daar cyclonaal, dus tegen de wijzers van de klok in. Dit wekt verbazing omdat het verschijnsel te klein is en ook niet lang genoeg duurt om de relatief zwakke Corioliskracht van invloed te laten zijn op de luchtstroming. Een doorsnee van het verschijnsel van 100 m is al groot en een duur van een half uur al lang. De Corioliskracht is een kracht, die ontstaat door de draaiing van de aarde. Door deze kracht stroomt de lucht niet recht toe recht aan van de hoge naar de lage druk, maar krijgt een zijdelingse afwijking, op het noordelijk halfrond naar rechts. Is de luchtbaan lang genoeg en treedt er geen wrijving op, dan stroomt de lucht na enige tijd zelfs evenwijdig met de isobaren en vindt er geen transport plaats van de hoge naar de lage druk. Deze situatie vinden we echter niet aan het aardoppervlak, depressies worden gekenmerkt door spiraalsgewijs naar het centrum toe stromende lucht.

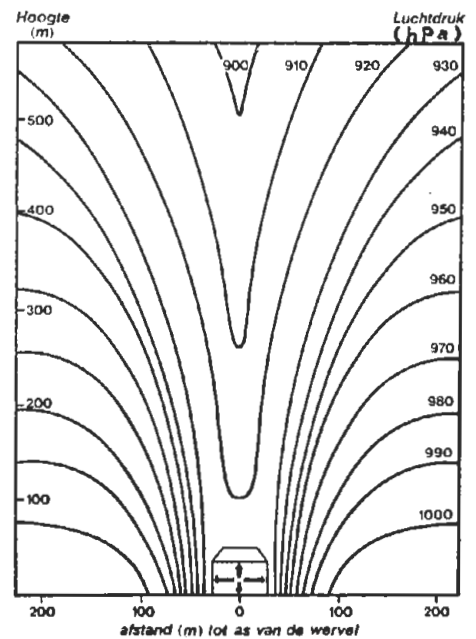
De grote buiencomplexen, die ontstaan in onstabiele lucht of aan koufronten, veroorzaken in hun ontstaansgebied een vlak lagedrukgebied doordat aan de top van de buien lucht naar de omgeving is weggestroomd. Zo'n beperkt en vlak lagedrukgebied, aangeduid met mesolaag, kan ook ontstaan door zomerse verhitting van bepaalde delen van een continent, en is groot genoeg en bestaat ook lang genoeg om de Corioliskracht de gelegenheid te



Luchtstromingen in een langlevende, trekkende bui met hooswervel: A van boven gezien, B overlangse doorsnede met straalstroom (j), C dwarsdoorsnede nabij wolkenbasis.

geven de in de onderste luchtlagen toestromende lucht een afwijking te geven. Het gehele complex krijgt dan een langzame cyclonale draaiing. Het is waarschijnlijk deze cyclonale draaiimpuls, die tornado's en windhozen hier een cyclonale rotatie bezorgt. Al op enige afstand van de tornadotrichter is soms te zien dat de wolken een cyclonale draaiing ondergaan. Op de foto op pagina 5 is dit duidelijk te zien aan de bewolking rond de sokkel, een cirkelvormige uitzakking aan de basis van de buienwolk waaruit de tornado zich ontwikkelt. Van Nederland is niet bekend of de windhozen in meerderheid een cyclonale draairichting bezitten. Van enkele zware windhozen weet men het wel. Zo had de zware windhoos die op 25 juni 1967 de bossen bij Chaam en het dorp Tricht voor een deel verwoestte, een cyclonale rotatie. Eveneens een cyclonale rotatie had de windhoos, die op 17 juli 1987 een spoor van vernieling trok door de bossen van het schietterrein bij Oldebroek, waar ook een groot kassencomplex werd verwoest.

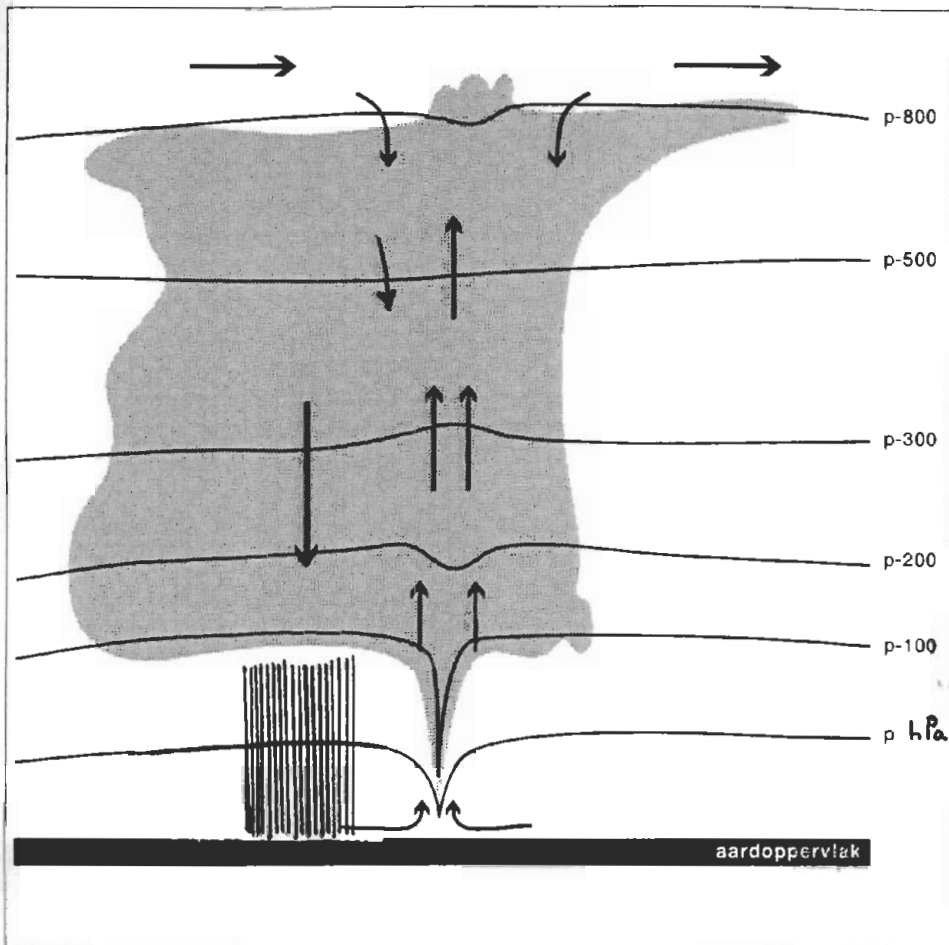
De met hoge snelheid in de buienwolk opstijgende warme luchtbellenschietsen door het niveau waar verzadigde adiabatische opstijging niet meer mogelijk is. Deze doorschietende toppen geven het bovenaanzicht van de buienwolk het bobbelige uiterlijk van kokende melk. Aan de top van de wolk stroomt de lucht



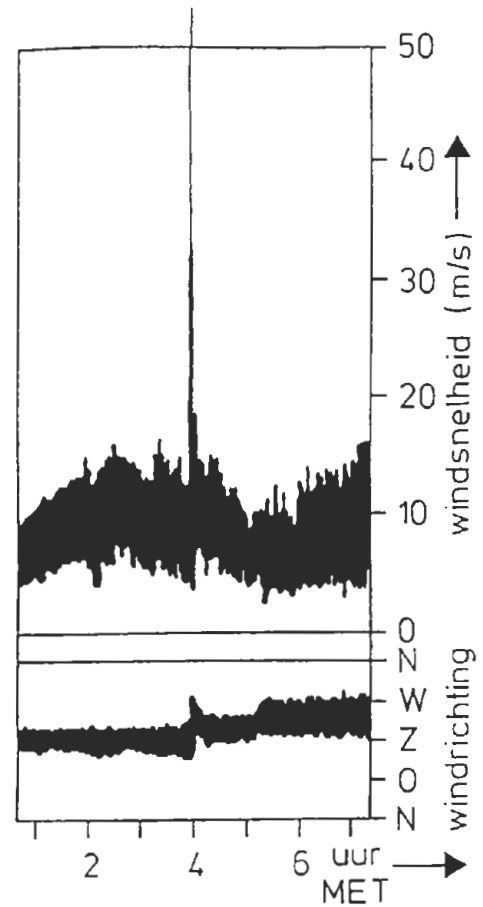
Isobaren bij een verticale doorsnede van een hoosslurf. De luchtdrukgradiënt is het grootst rondom de kern van de slurf.

zijdelings weg. De kolom warme lucht heeft het karakter van een schoorsteen waarin een enorme trek staat. De lucht, die onder de bui wordt aangezogen, bezit de zwakke draaiimpuls van de meso-depressie waarin het buiencomplex is ontstaan. Als de lucht uit de omgeving naar de sterk zuigende schoorsteen stroomt, wordt de draaicirkel kleiner en de draaisnelheid groter (behoud van draaiimpuls). Een fietser, die na snelheid te hebben gemaakt, zonder te trappen in een kring rijdt en de kringetjes daarbij steeds kleiner maakt, zal merken dat zijn snelheid daarbij toeneemt. Door het behoud van draaiimpuls van de toestromende lucht komt de hoos of tornado aan de snelle rotatie.

De isobarische vlakken in de atmosfeer, die onder normale omstandigheden een vlak golvend verloop hebben, krijgen onder in de wolk rond de sterk trekkende schoorsteen, wegens het eerder genoemde snelle wegstroom van de warme lucht aan de top van de wolk, de trechtervorm, die zich onder de basis van de wolk in de daar liggende drukvlakken voortzet. Door het verlagen van de luchtdruk onder de wolkenbasis kan daar condensatie van de waterdamp eerder plaatsvinden dan elders onder de wolk, waar het convectieve condensatieniveau bereikt moet worden: de wolkenbasis gaat omlaag. Condensatie betekent de productie van warmte, die ten goede komt aan de in de hoos opstijgende lucht. Hierdoor treedt een verdere drukverlaging op en op een nog lager niveau vindt dan weer condensatie plaats:



Geschematiseerd verloop van de drukvlakken binnen een bui, waaraan zich een hoos heeft ontwikkeld. (Wessels, 1994, pers. med.)



Registratie van de wind op Vlieland, toen daar op 5 november 1948 een windhoos over of vlak langs de windmeter trok.

langzaam groeit de wolkenbasis in de vorm van een trechter of een slurf naar beneden als een indicatie voor de geleidelijk uitzakkende drukvlakken. Bereikt de slurf of trechter het aardoppervlak, dan snijdt het aardoppervlak de omlaaggekromde drukvlakken waardoor daar een uiterst grote luchtdrukgradiënt ontstaat: de isobaren liggen er vlak bij elkaar. De luchtdruk in het centrum van de hoos kan tot 100 hPa lager liggen dan in de onmiddellijke omgeving. Op enkele honderden meters afstand van de hoos heerst bijvoorbeeld al een luchtdruk van 1010 of 1020 hPa. De windsnelheden, die door deze grote luchtdrukgradiënt worden opgewekt kunnen wegens hun vernielende kracht zelden met anemometers worden gemeten. Uit metingen met een Doppler radar, waarmee de beweging van neerslag- en wolkendeeltjes op een scherm kan worden gevolgd, zijn windsnelheden berekend van ten minste 300 km per uur. Bij berekeningen aan vernielde staalconstructies kwam men in de Verenigde Staten tot de conclusie dat de wind een snelheid van tenminste 550 km per uur moest hebben gehad om de geconstateerde deformaties tot stand te brengen. Van

weer een andere tornado, waarvan de voortbewegingssnelheid was gemeten, kon men uit luchtfoto's, waarop de merktekens waren te zien van verplaatste voorwerpen, berekenen dat de wind een snelheid moest hebben gehad van 780 km per uur. Het moet niet onmogelijk worden geacht dat er ooit een tornado tot ontwikkeling kan komen waarin de wind de snelheid van het geluid, ongeveer 1200 km per uur, benadert. Maar voorlopig houdt men in Amerika de maximale windsnelheden, waarmee rekening gehouden moet worden bij het voorbijtrekken van een tornado, op ruim 500 km per uur. Dat wil dus zeggen dat de vernielende kracht van tornadowinden, ofschoon werkzaam op een veel kleiner gebied, groter is dan die van de wind van tropische orkanen, waarbij hoogste windsnelheden zijn geconstateerd van ongeveer 350 km per uur.

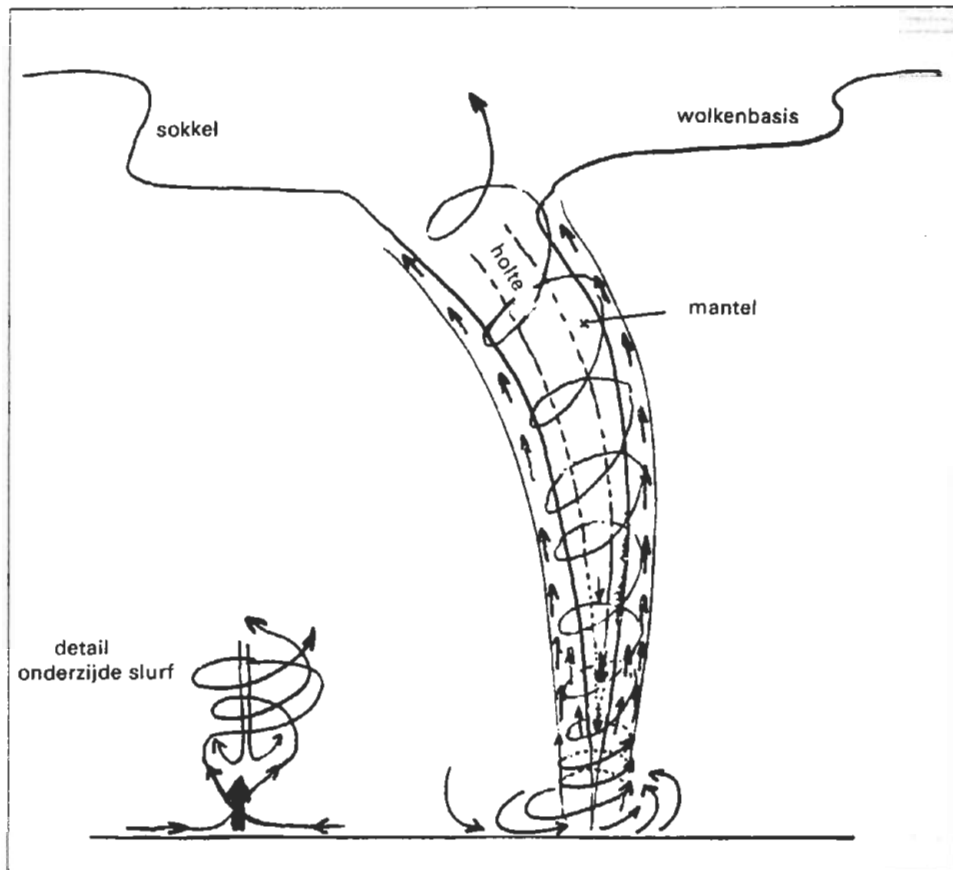
In Nederland is er slechts één waarneming bekend waarmee iets gezegd kan worden over de windsnelheden, die hier te lande optreden bij windhozen. Op 5 november 1948 was er sprake van een toevalstreffer. Toen trok er een windhoos over de wind-

meter van Vlieland, die was voorzien van een registratietrommel en zo werd alles netjes opgetekend. Bijkomend toeval was dat de windhoos weer niet zo krachtig was dat de windmeter het loodje legde, wel sloeg de schrijfpennetjes uit tot op het metaal van de registratietrommel. De geregistreerde windsnelheid werd bepaald op 56 m per seconde of ruim 200 km per uur. Deze snelheid valt in het niet bij die van de Noord Amerikaanse tornado's, maar uit het schadebeeld van de zware windhozen, die Borculo (1925), Neede (1927), en Tricht (1967) teisterden, krijgt men de indruk dat de windsnelheden toen hoger zijn geweest. Een pikante bijzonderheid is dat er bij de windhozen van Vlieland helemaal geen hoosslurf of -trechter is gezien. De geweldige windvlaag trad namelijk op om vier uur 's nachts, dus in het aardedonker. Maar aangezien de gemiddelde windsnelheid voor en na dit tijdstip niet hoger lag dan ongeveer 10 m per seconde (windkracht 5) kon niet anders worden geconcludeerd dan er sprake was geweest van een windhoos. Ook de registratie van de windrichting gaf hiervoor een aanwijzing, de windrichting veranderde tijdens de hevige windvlaag met ongeveer 90 graden.



De hoosmantel van wolkendruppeltjes geeft aan tot hoever de drukvlakken zijn uitgezakt. Zolang de uiterste punt van de trechter het aardoppervlak nog niet heeft bereikt, is er aan het aardoppervlak niets aan de hand. Het kan er zelfs op dat ogenblik nog doodstil zijn. Het verder neerdalen van de trechter kan echter in korte tijd gebeuren. Ook kan de hoos-trechter plotseling weer van het aardoppervlak loslaten. Dan houdt het schadespoor plotseling op. Illustratief in dit opzicht is de belevenis van een boer uit Kansas, die op zijn akker werkte toen de slurf van een tornado met grote snelheid naderde. Bijna ieder boerengezin uit de Cornbelt in de V.S. heeft een zogeheten cycloonkelder, waarin bij de nadering van een tornado kan worden geschuild. De boer, Will Keller, rende naar de boerderij om zijn gezin te waarschuwen om in de kelder te gaan. Toen hij op het punt stond de deur achter zich dicht te slaan, keek hij nog even achterom en zag toen dat de onderkant van de slurf van de aarde losraakte. Hij wist wat dat betekende en bleef staan. Als het ondereinde weer zou neerdalen kon hij de deur direct sluiten. Terwijl de tornado naderde verhief het uiteinde zich steeds verder boven de grond. Ten slotte hing het recht boven hem. Een gierend sissend geluid kwam uit het uiteinde van de slurf. Toen hij omhoog keek kon hij in het hart van de tornado kijken. In het midden van de slurf bevond zich een ronde opening met een doorsnede van ongeveer 15 tot 30 meter en vandaar uit strekte een holle buis zich uit tot een hoogte van tenminste een kilometer. De wanden van de buis bestonden uit ronddraaiende wolkenmassa's. Dankzij bliksemschichten, die van de ene kant naar de andere zijde van de tornado-buis zigzagden, was dit alles goed te zien. Heel bijzonder was de aanwezigheid van een aantal kleinere tornado's, zogeheten zuigwervels, die rond het uiteinde van de grote slurf kronkelden. Zij maakten het sissende geluid. De wolkenmassa rond de grote tornado draaide volgens Keller cyclonaal, maar van de kleine zuigwervels draaiden sommige cyclonaal en andere anticyclonaal.

Van zo nabij zijn er van windhozen en tornado's praktisch geen waarnemingen. De uiterst lage luchtdruk in het centrum van de windhoos of tornado kan alleen gehandhaafd worden als de met tientallen meters per seconde omhoog schietende warme lucht niet alleen voortdurend wordt aangevuld maar bovenin de wolk ook snel wordt afgevoerd. Naast de voor-



*Schema van de luchtcirculatie rond een hoosslurf. Er bestaat een snel draaiende stijgstroom, waarin druppeltjes of stofdeeltjes op een bepaalde afstand rond de kern draaien. Zware voorwerpen worden, na te zijn opgezogen uitgeslingerd.*

waarde van warme en vochtige lucht aan het aardoppervlak en (veel) drogere lucht in de hogere niveaus is er een derde voorwaarde, namelijk de aanwezigheid van een krachtige straalstroom, waarvan de stroming boven het buiengebied een zodanige structuur heeft dat er verticale luchtbewegingen in de atmosfeer worden opgewekt. Zo'n gebied werkt als een zuigpomp voor de bovenkant van de wolk, waarin een schoorsteen uitmondt. De straalstroom voert ook de bovenste wolkelementen mee waardoor de top van de wolk het karakteristiek beeld vertoont van een langgerekt aambeeld. Straalstroom en windhoos geven het radarbeeld van een buienwolk een typische gedaante, dat van een vishaak of een magere 6. Deze uiterst merkwaardige echo werd in het begin van de jaren zestig ontdekt door de Amerikaanse meteoroloog Fujita. De vishaakvorm is schoolvoorbeeld van een echo waaraan een hoos of tornado is verbonden. In de praktijk zijn alle echo's, die scherpe hoeken vertonen, verdacht. Dit was ook het geval met één van de echo's op 28 augustus 1981 om 17.00 uur. Het vliegtuig was echter al vertrokken voordat dit beeld beschikbaar was. De boordradar is niet geschikt voor het navigeren binnen de radar-echo van een zware bui. Hij kan alleen

gebruikt worden om zware onweersbuien in zijn geheel te vermijden. In het vliegtuig zal de karakteristieke vorm van de echo hoogstwaarschijnlijk in het radarbeeld niet tot uiting zijn gekomen. In de Verenigde Staten zijn de vishaakecho's in de voorjaarsmaanden een regelmatige verschijning. Soms worden binnen het gebied dat de radar bestrijkt, er een aantal tegelijk waargenomen.

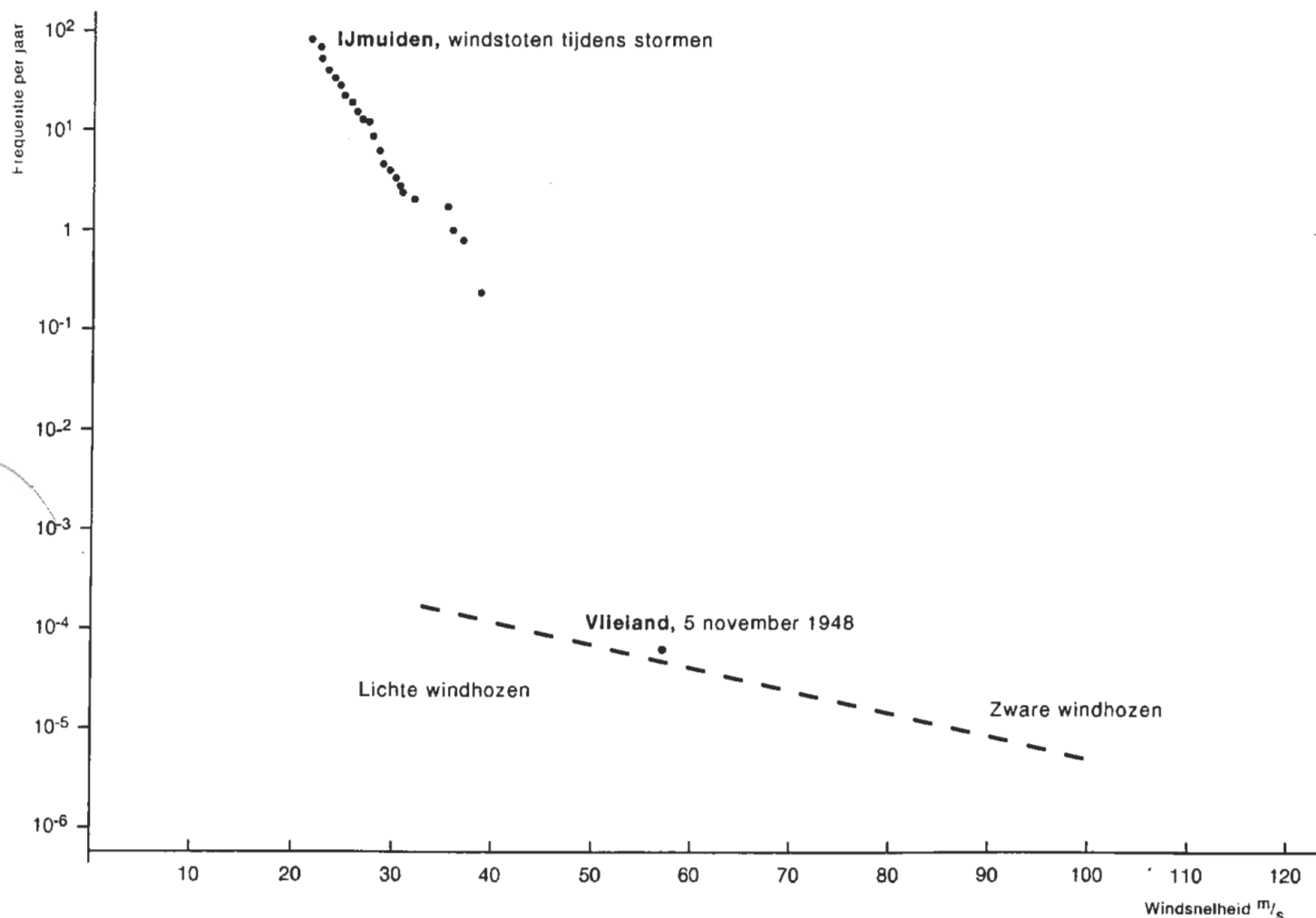
Dat de straalstroom ook in Nederland een belangrijke rol speelt bij het ontstaan en het zich enige tijd handhaven van zware windhozen (tornado's) blijkt uit de richting van het schadespoor dat deze windhozen trokken. Ze lopen vrijwel zonder uitzondering zzw-wno. Als een noordoostwaarts gerichte straalstroom over onze omgeving loopt, kan het voorkomen dat er ook boven onze omgeving gebieden in voorkomen met de werking van een zuigpomp. Dat betekent in het zomerhalfjaar de vorming van actieve onweersstoringen en zware, zich handhavende buien. Aan de voorzijde van uit het westen binnendringende koufronten kan de opbouw van de atmosfeer gunstig zijn voor de vorming van zware windhozen. Overigens zijn die zo zeldzaam dat er in de weerberichten niet voor gewaarschuwd wordt, ook al omdat niet gezegd kan worden waar zo'n



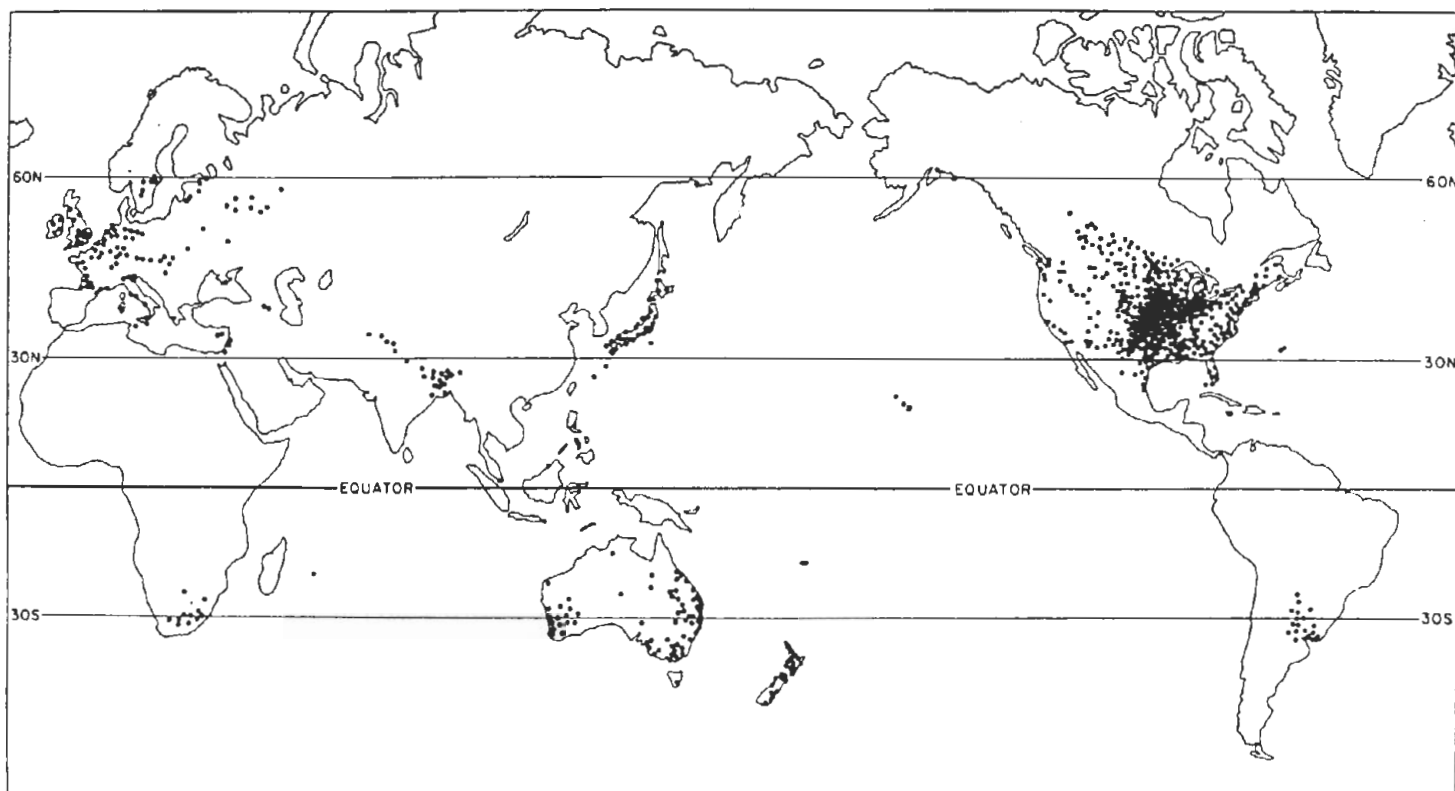
hoos zich zal ontwikkelen. In de geschiedenis van de Nederlandse weersverwachtingen is slechts eenmaal met succes voor de vorming van zware windhozen gewaarschuwd. Dat was op de ochtend van 25 juni 1967, in de weersverwachting die om 09.00 uur voor de radio werd omgeroepen. Controverse tussen de dienstdoende meteorologen leidde er toe dat deze waarschuwing gedurende de rest van de dag uit de verwachting verdween. Aan het einde

*Schadesporen van zware windhozen in Nederland na 1900. Zware windhozen kwamen in de 20ste eeuw bijna uitsluitend voor in de zuidoostelijke helft van Nederland. Merk op dat de sporen bijna zonder uitzondering zzw-*nno* zijn gericht.*

van de middag werd het Betuwse dorp Tricht door een zware windhoos voor een deel verwoest. Omdat er in Nederland gemiddeld slechts eenmaal in de tien jaar een zware windhoos tot ontwikkeling komt en er dan ook nog niet altijd slachtoffers vallen, is een waarschuwingssysteem hier geen urgente zaak. In de Verenigde Staten ligt dat anders, de door tornado's aangerichte schade bedraagt daar per jaar gemiddeld anderhalf miljard dollar. De jaarlijkse schade nam er toe van de jaren twintig tot de jaren tachtig en bleef daarna ongeveer constant. Het aantal slachtoffers is in die tijd voortdurend afgenomen, van gemiddeld 213 per jaar in de jaren twintig tot gemiddeld 16 per jaar in de jaren tachtig. Deze tegengestelde ontwikkeling vraagt om enige uitleg. De toename van de schade kan deels verklaard worden door de toename van het aantal jaarlijks voorgekomen tornado's, maar heeft vermoedelijk meer te maken met toename van schadegevoelige bebouwing in de streken waar tornado's voorkomen. De sterke afname van het aantal doden, geheel in tegenstelling tot de toename van het aantal tornado's en de tot in de jaren zeventig toegenomen schade valt alleen te ver-



**Frequenties van het optreden van hoge windsnelheden voor één locatie.**



Locaties waar zich tornado's ontwikkelden in het tijdvak 1963-1966. De grote concentratie in de V.S. omvat 2600 tornado's.

klaren door de ontwikkeling van een perfect waarschuwingssysteem. De ruggegraat van dit waarschuwingssysteem wordt gevormd door de "tornado spotters", vrijwillige waarnemers, die voortdurend naar tornado's speuren en de positie en trekrichting doorgeven aan plaatselijke radio- en televisiestations. De "killers" onder de tornado's doen zich thans voornamelijk in de nacht voor. Of de toename van het aantal tornado's van gemiddeld ongeveer 150 per jaar in het begin van deze eeuw tot ongeveer 1000 per jaar aan het eind van de jaren zeventig - daarna nam het aantal weer iets af - reëel is, zijn de specialisten het nog niet over eens. De meest aannemelijke verklaring is echter de verbetering in het opsporings- en rapportagesysteem. Mogelijk is er in de jaren zestig en zeventig wel een reële toename geweest. Na 1980 neemt het aantal waargenomen tornado's namelijk weer af. Tijdens de top in de jaren zeventig deed zich op 3 en 4 april 1974 een enorm aantal tornado's voor. In die relatief korte tijd kwamen er 148 tot ontwikkeling. De langste schadebaan bedroeg 50 km, de breedste ruim één km. Er vielen meer dan 300 doden en 5400 gewonden. De totale schade bedroeg honderden miljoenen dollars. Tegen het verschijnsel zware windhoos (tornado) valt weinig meer te doen dan een waarschuwing en een goede bescherming. Aan het voorkomen van tornado's is de wetenschap nog niet toe.

In 1967 deed de theorie van Rossow, een NASA-wetenschapper opgang. Volgens Rossow had het ontstaan van tornado's een elektrische achtergrond: wolkenlagen met tegengesteld geladen wolkendruppeltjes zouden bij toenemend spanningsverschil om elkaar heen gaan draaien indien sterke turbulentie daartoe de eerste aanzet zou hebben gegeven. Deze rotatie zou tot staan gebracht kunnen worden door de wolkenlagen kort te sluiten. Dit zou uitgevoerd kunnen worden door een raket in de wolken te schieten, waaruit met een remparachute een lange metalen draad kon worden afgewikkeld, waardoor het spanningsverschil kon worden opgeheven. Het is onbekend of dit experiment ooit in de praktijk is gebracht, maar zeker is dat voor het ontstaan van tornado's deze theorie niet meer wordt aangehangen.

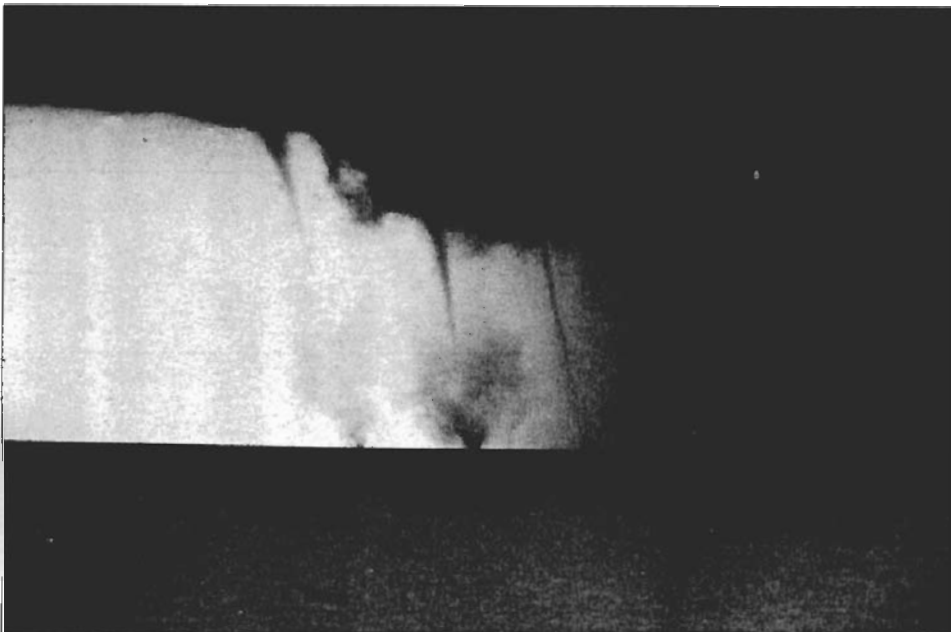
### WATERHOZEN

Waterhozen zijn windhozen boven een wateroppervlak. Zij zijn in het algemeen minder krachtig dan windhozen die zich boven land ontwikkelen. Ook is het tijdstip van voorkomen niet gebonden aan bepaalde uren van de dag. "Landhozen" komen vooral in de namiddag voor wanneer het landoppervlak zijn hoogste temperatuur bereikt, bij waterhozen is dit niet het geval, het wateroppervlak verandert immers gedurende het etmaal nauwelijks van temperatuur. Het wateroppervlak bereikt evenmin extreem hoge temperaturen, zodat

de temperatuur in de onderste luchtlagen er minder snel met de hoogte afneemt als in de namiddag boven land. Toch valt er nog een duidelijke relatie van het voorkomen van waterhozen met de temperatuur van het wateroppervlak waar te nemen: langs onze kust worden waterhozen het meest in de nazomer en herfst gezien.

Kenmerkend voor een waterhoos is de langgerekte buisvorm, brede trechters worden zelden waargenomen. Men ziet heel vaak dat de buis bestaat uit een binnen- en een buitenmantel, wat verklaard kan worden door aan te nemen dat druppeltjes van verschillende grootte rond de kern draaien. De holle kern van een waterhoos wordt veroorzaakt doordat de condensatiedruppeltjes zich daar ophopen waar de middelpuntzoekende kracht (ontstaan tengevolge van de rotatie) gelijk is aan de middelpuntvliedende kracht (ontstaan tengevolge van de spiraalsgewijs toestromende lucht). De grootte van de druppeltjes bepaalt de afstand tot de kern van de hoos. Draaien er rond de kern nog andere deeltjes, bijvoorbeeld grotere opgezogen waterdruppels, dan zullen voor die druppels op een andere afstand tot de kern de middelpuntvliedende en de middelpuntzoekende kracht met elkaar in evenwicht zijn. Zo ontstaan er twee "buizen".

Waterhozen komen soms in grote aantallen tegelijkertijd voor. Zo werden op 26



*Twee waterhozen onder een bui boven de Zwarte Zee. Heel duidelijk is een wolk van opwervend zeewater. De hozen bevinden zich buiten het neerslaggebied.*

augustus 1982 vanuit Vlieland boven de Waddenzee in een tijdsbestek van ruim een uur negen waterhozen gezien. Op 29 augustus 1992 deden zich langs de Nederlandse kust acht waterhozen voor, waarvan sommige ook landinwaarts trokken.

Een vraag is altijd geweest wat een waterhoos doet met het in spiralen opgezogen water. Het laatste is vele malen duidelijk waargenomen. In de eerste plaats wordt er aan de voet van de hoos al veel water uitgeworpen. Er draait daar een mantel van sproeiend water rond. Bij daarvoor gunstige omstandigheden is er soms een regenboog in waargenomen. Vlak boven het wateroppervlak zal er sprake zijn van grote waterdruppels. Meer naar boven zullen de druppels kleiner worden en ten slotte in de wolk verdwijnen. Aangezien er vlak in de buurt van (water)hozen vrijwel nooit neerslag wordt waargenomen, lijkt het aannemelijk dat het opgezogen en uiterst fijn verdeelde water elders in de wolk in het neerslagvormende proces wordt opgenomen.

Uiterst merkwaardig lijkt het dat waterhozen niet voorkomen in de buurt van de evenaar. Daar heeft het zeewater zeer hoge temperaturen (30 °C), terwijl zware buien er de orde van de dag zijn. Het ontbreken van de Corioliskracht zou een aardige verklaring zijn, zij het niet dat eerder is aangetoond dat het verschijnsel hoos (of tornado) te klein is en een te geringe levensduur heeft om daar invloed van de ondervinden. De verklaring is dat ook de vlakke lagedrukgebieden nabij de

evenaar door het ontbreken van de Corioliskracht geen cyclonale draaiing opwekken en de wolken van het buiencomplex dus evenmin een langzame cyclonale draaiing ondergaan.

### **S**TOF- EN ZANDHOZEN

Stof- en zandhozen doen zich uitsluitend voor in de onderste luchtlagen. Zij ontstaan boven sterk verhitte oppervlakken en zijn nooit verbonden met wolken, die tijdens hun optreden overigens wel aanwezig kunnen zijn. Zandhozen zijn karakteristiek voor steppen en woestijnen. In ons land zijn ze bekend van zandverstuivingen en het hogere, droge strand, en in de laatste halve eeuw ook van onbegroeide landbouwgronden zoals de aspergeakkers in midden- en noord-Limburg.



*Het kronkelige spoor van een zuigwervel op een akker in de Verenigde Staten.*

Een voorwaarde voor hun ontstaan is een sterk overadiabatische temperatuurgradiënt aan het oppervlak, dus een daling van de luchttemperatuur met meer dan één graad Celsius per 100 m stijging. Als het aardoppervlak bovendien onregelmatig wordt verwarmd, stijgen plaatselijk sterk verhitte luchtbellens met grote snelheid omhoog. Omdat het overadiabatische deel van de temperatuurkromme zich slechts uitstrekt over een vrij dunne luchtlaag, komen deze bellen zelden hoger dan 100 m. Dit valt af te leiden uit fijn zand en stof dat met de stijgende lucht omhoog werfelt. Doordat er een duidelijk laag plafond voor de opstijgende luchtbellens bestaat en er op die hoogte geen luchtafvoerende straalstroom zorgt voor de in stand houding van de verticale stroming, is de levensduur van stof- en zandhozen doorgaans niet langer dan enkele minuten. Temperatuurmetingen in een woestijngebied van Arizona brachten aan het licht dat tijdens de piek-activiteit van het optreden van "dust devils", in juli en augustus tussen 10 en 14 uur plaatselijke tijd de temperatuur van de woestijnbodem dagelijks opliep tot omstreeks 43 °C. Dikwijls werden temperaturen van meer dan 55 °C gemeten en in één geval zelfs van 65 °C! Overigens zijn oppervlaktetemperaturen van omstreeks 60 °C in de maanden juni en juli op kale, droge zandgronden ook in ons land gemeten. Ook bij zand- en stofhozen is soms duidelijk een holle kern te zien, een aanwijzing dat ook boven land de opgezogen vaste deeltjes zich daar verzamelen waar centrifugale en centripetale kracht met elkaar in evenwicht zijn. Dat de holle kern bij de meeste tornado's van opzij niet wordt waargenomen, kan veroorzaakt worden



door een grote concentratie van deeltjes (druppeltjes of opgezogen vaste deeltjes) rond de cylinder.

Stof- en zandhozen zijn veel minder krachtig dan hozen, die van een buienwolk uitgaan. Toch veroorzaken zij in sommige gevallen schade en gewonden. Enkele zijn namelijk krachtig genoeg om vrij zware voorwerpen op te tillen en te verplaatsen. Zo werd op 9 mei 1989 een vrouw gewond, toen een stofhoos, ontstaan boven een volkstuintencomplex bij Breda een opgezogen kasruit op haar neerkwakte toen zij bij haar vlucht was gestruikeld. Deze hoos, die slechts twintig seconden bestond, was dus in staat voorwerpen van enkele kilogrammen op te zuigen. Het typisch huilende of loeiende geluid, dat een hoos voortbrengt, ontbrak evenmin.

#### Lijst van windhozen, in Nederland voorgekomen sinds 1950

(deze lijst pretendeert niet volledig te zijn)

Willemstad	21 juni 1950
Kroondomeinen	23 aug. 1950
Haulerwijk	23 aug. 1950
St. Nicolaasga	14 juli 1955
Ten Boer	29 juli 1956
Chaam-Tricht	25 juni 1967
Peeldorpen	19 juli 1967
Ommen	13 aug. 1967
Tiel	27 mrt. 1972
Enschede	7 apr. 1972
Haren (Gr)	15 mei 1972
Doetinchem	6 juni 1972
Ameland-I	11 aug. 1972
Breukelen	19 apr. 1974
't Zand (Gr)	14 juli 1975
Maartensdijk	3 jan. 1978
Haaksbergen	3 sept 1979
Zierikzee	10 nov. 1979
Beesd	3 aug. 1980
Moerdijk	6 okt. 1981
Utrecht-Bilthoven	12 mei 1983
Assen	23 juni 1983
Rijswijk	24 juni 1985
Slachteren	26 aug. 1986
Julianadorp	28 aug. 1986
Oldebroek	17 juli 1987
St. Maartenszee	9 juli 1988
Colijnsplaat	28 aug. 1988
Lottum	7 okt. 1988
Urmond	16 mrt. 1989
Zwolle	26 juni 1989
St. Willebrord	4 apr. 1990
Angerlo	5 juni 1992
Ameland-2	17 aug. 1992

*criterium windhoos: er is een slurf of trechter gezien (overdag) of er is een loeiend geluid gehoord ('s nachts).*

#### Zware windhozen voorgekomen in Nederland in de 20ste eeuw

Borculo	10 augustus 1925	3 slachtoffers
Neede	7 juni 1927	7
Willemstad	21 juni 1950	2
Veluwe (Kroondomeinen)	23 augustus 1950	0
Ten Boer	29 juli 1956	0
Chaam-Tricht	25 juni 1967	7
Ameland-1	11 augustus 1972	4
't Zand	14 juli 1975	0
Oldebroek	17 juli 1987	0

*Hoewel de windhoos Ameland-2 (17 augustus 1992) één dode eiste kan hij gezien de opgetreden verschijnselen wat de sterkte betreft niet onder de zware windhozen worden gerangschikt.*

Dergelijke vrij krachtige stofhozen kunnen ook op de platforms van vliegvelden ontstaan en vormen daar een gevaar voor helicopters en lichte vliegtuigen. Bovendien zijn zij niet altijd waar te nemen doordat ze boven het platform geen stof of zand kunnen opzuigen.

De draairichting van stofhozen is volstrekt willekeurig cyclonaal of anticyclonaal. De meest aangehangen theorie is dat de lucht in rotatie wordt gebracht door horizontale windschering. Een aanwijzing hiervoor is dat de maximale "dust devil" activiteit boven de Australische woestijn optrad tijdens het moment waarop de grootste variabiliteit in de windrichting optrad.

*Een eerdere, minder uitgebreide versie van dit artikel is gepubliceerd in het tijdschrift ZENIT, jg. 21 (1993) no. 1.*

#### Literatuur

H.R.A. Wessels, De zware windhozen van 25 juni 1967. Hemel en Dampkring 66 (1968), pag. 155 tot 177.

H.R.A. Wessels, Windhozen, krachterspel tussen stijgende en roterende lucht. *Zenit* 3 (1976), pag. 186-193.

H.F.M. Otten, Het sloperswerk van tornado's. *Zenit* 8 (1981), pag. 172-177.

W.T. Roach and J. Findlater, An aircraft encounter with a tornado. *The Meteorological Magazine*, Vol 112 (1983) no 1327, pag. 29-48.

Raad voor de luchtvaart. Uitspraak van de raad voor de luchtvaart inzake het ongeval op 6 oktober 1981 nabij Moerdijk aan het vliegtuig PH-CHI. 's-Gravenhage. 1983.

A. Delder, Hozen en hozentheorieën. KNMI-Verspreide opstellen 2. 's-Gravenhage. 1955.



*Luchtfoto van een stofhoosje bij Veenendaal op 22 mei 1952. Te zien is de buisvormige kern en het spoor op de akker. (foto fototechnisch en cartografisch bedrijf KLM)*