

# **OP JACHT NAAR STOFDUIVELS, MATADOR 2002**

Henk de Bruin, Oscar Hartogensis en Dirk Burose (Wageningen Universiteit)

**Stel je bent astronaut en je hebt er meer dan twee jaar over gedaan om de planeet Mars te bereiken. Je hightech Marsvoertuig maakt een perfecte landing op de berekende plaats en dan gebeurt het: je wordt getroffen door een Martiaanse stofhoos. Het fijne stof dringt door de kleinste openingen van je Marsvoertuig, windsnelheden bereiken orkaankracht en elektrische ontladingen verbreken het radiocontact met aarde; al je computersystemen slaan op tilt. Zoiets kan je hele Martiaanse dag verpesten. Ook op aarde vormen stofhozen een gevaar voor de kleine luchtvaart. Verder zijn het efficiënte transporteurs van warmte en stof en ze spelen daardoor een aparte rol in het klimaatsysteem. Over deze bijzondere transportmechanismen is weinig bekend, vooral hoe stofhozen ontstaan. Kortom redenen genoeg om in juni 2002 deel te nemen aan MATADOR 2002, een onderzoeksproject in de woestijn van Arizona. Het doel was met onze micrometeorologische apparatuur zoveel mogelijk stofhozen te 'vangen'. In de nu volgende korte schets van de achtergronden van het MATADOR-project zullen we stofhozen af en toe met de Engelse term "dust devils" aanduiden.**

## **Het belang van stofhozen**

Onze leerstoelgroep verricht al jaren onderzoek in semi-aride gebieden, daar waar het in de regentijd harder regent dan in Nederland (100 mm per dag is dan niet extreem) en in de droge tijd - die maandenlang duurt - geen druppel water valt. Het betreft zeer uitgestrekte gebieden, die zeer gevoelig zijn voor klimaatveranderingen. De gemiddelde jaarsom van de neerslag is er ongeveer 300 mm, het minimum dat nodig is voor landbouw, maar het ruimtelijk neerslagpatroon vertoont grote noord-zuid gradiënten. Dat betekent dat bij een kleine verschuiving van het neerslagpatroon de gevolgen enorm zijn. Verschuiving naar de natte kant betekent meer regen, dus veel hogere gewasopbrengsten en economische welvaart. Echter een verschuiving naar de droge kant betekent misoogsten en leidt zo tot armoede en hongersnood. Onze groep houdt zich bezig met atmosfeer-land uitwisseling van warmte, waterdamp (verdamping) en CO<sub>2</sub>. Tijdens de meetcampagnes in semi-aride gebieden werden geregeld stofhozen waargenomen. Kaimal en Businger (1970) hebben aangetoond dat deze "mooi-weer-tornado's" veel warmte en stof de atmosfeer in kunnen pompen. De kans, echter, dat een stofhoos door opgestelde meetapparatuur kan worden 'gevangen' is klein. Het is dus mogelijk dat een belangrijk deel van de warmte die de onderste luchtslaag overdag opwarmt met klassieke meetmethoden gewoon wordt gemist. Dat betekent vervolgens dat in weer- en klimaatmodellen warmteuitwisselingsprocessen boven semi-aride gebieden onjuist worden beschreven, want de daarin gebruikte parameterisaties zijn 'getuned' op waarnemingen. Daar komt nog bij dat men steeds meer beseft dat verandering van het aantal stofdeeltjes (aërosolen) in de atmosfeer tot effecten kan leiden die vergelijkbaar zijn met het versterkt broeikaseffect, veroorzaakt door een toename van het CO<sub>2</sub>-gehalte. Er is een mogelijkheid dat de twee fenomenen elkaar beïnvloeden: door temperatuurstijging ten gevolge van het versterkt broeikaseffect zou het aantal stofhozen in semi-aride gebieden kunnen toenemen, waardoor er meer stofdeeltjes in de grenslaag worden gebracht, wat weer de temperatuur in de grenslaag beïnvloedt en het broeikaseffect versterkt.

Recent onderzoek heeft aangetoond dat stofhozen een belangrijke rol spelen in het klimaatsysteem op Mars. Hier kunnen stofhozen een hoogte van 10 km bereiken. Bovendien kunnen stofhozen sterke elektrische velden genereren die zich in de Martiaanse atmosfeer tot boven de doorslagspanning kunnen ontwikkelen, waardoor er elektrische ontladingen in Martiaanse stofhozen kunnen voorkomen. Tenslotte is de intrigerende vraag hoe stofhozen kunnen ontstaan, want meestal vormen ze zich onder omstandigheden dat de atmosfeer vlak bij de grond sterk turbulent is door opwarming aan het aardoppervlak. Turbulentie betekent chaos (denk aan kokend water), echter stofhozen zijn zeer georganiseerde systemen met een eigen rotatie (vorticeiteit). De vraag is dus hoe deze georganiseerde structuren in een chaotisch turbulent veld kunnen ontstaan en hoe ze aan hun rotatie komen. Zie hier genoeg wetenschappelijke doelstellingen om stofhozen te gaan bestuderen. Maar, we moeten eerlijk zijn: naast wetenschappelijke belangstelling is er natuurlijk ook onze menselijke fascinatie voor het verschijnsel zelf. De eerste auteur (HdB) kwam ze voor het eerst tijdens veldwerk tegen in begin jaren negentig in Spanje (de eerste werd waargenomen in de hoogvlakte van La Mancha met op de achtergrond de molens die Don Quichote bevocht; kan het symbolischer?). Later kwam hij letterlijk in aanraking met een stofhoos toen het shuttlebusje dat hem van het vliegveld van El Paso naar Las Cruces bracht werd geraakt door zo'n stofduivel. Het busje kwam door de botsing op de andere weghelft terecht. Er was gelukkig geen ander verkeer. In de dagen daarna werden tijdens het veldwerk in de woestijn van New Mexico dust devils geregeld waargenomen. Twee jaar later, tijdens een kort sabbatsverlof in Thessaloniki, vond hij -op aanwijzing van Kyriazopoulos (1995)- in de byzantijnse Aghia Sophia in één van de kapitelen een sculptuur van een windhoos. In december 2001 kwamen we in contact met de onderzoeksgroep van Nilton Renno die prompt onze groep uitnodigde deel te nemen aan zijn dust devil onderzoeksprogramma in Arizona. Op deze manier konden de medeauteurs Oscar Hartogensis en Dirk Burose deelnemen aan het **MATADOR (M**artian **A**tmosphere and **D**ust in the **O**ptical and **R**adio) - **2002**-veldexperiment.

### **Algemene beschrijving stofhozen**

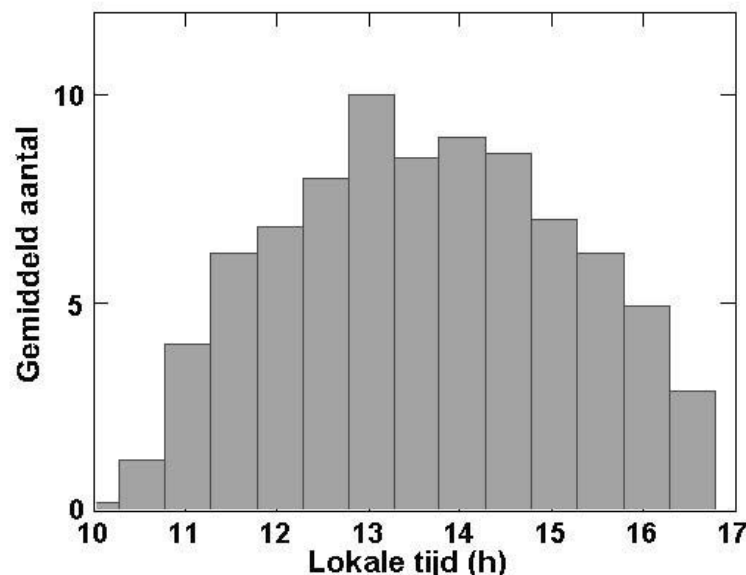
Eén van de eerste wetenschappelijke beschrijvingen van stofhozen is gegeven door Benjamin Franklin, de staatsman, journalist en wetenschapper. In 1775 reed hij te paard achter stofhozen aan om hun horizontale verplaatsingssnelheid te meten. Een stofhoos is één van de kleinste leden van een familie van geïsoleerde atmosferische wervelwindverschijnselen zoals tornado's, waterhozen, stoomhozen en vuurwervels. Stofhozen onderscheiden zich van tornado's, omdat zij bij heldere hemel voorkomen en dus niet, zoals tornado's, zijn verbonden aan convectieve bewolking. Vele blijven onopgemerkt, omdat ze pas voor ons oog zichtbaar worden als ze stof met zich meevoeren en het is waarschijnlijk dat ze ook boven stofvrije oppervlakken kunnen ontstaan. In het algemeen zijn stofhozen ongevaarlijk (Harry Geurts, [www.knmi.nl/voorl/nader/stofhoos.htm](http://www.knmi.nl/voorl/nader/stofhoos.htm)), maar er zijn gevallen bekend waarbij een dust devil leidde tot het verongelukken van een klein vliegtuig. Een voorbeeld is het ernstig ongeval in NW Victoria, Australië (Hess en Spillane, 1990). In 1968 werden stofhozen besproken tijdens het *Air Safety Symposium for General Aviation*, Longreach, Queensland, Australië en tegenwoordig wordt bij het opstellen van weersverwachtingen voor de luchtvaart de kans op voorkomen van stofhozen dan ook bepaald; er is zelfs een speciale code voor (Adrie Huiskamp, [www.knmi.nl/voorl/nader/int707.htm](http://www.knmi.nl/voorl/nader/int707.htm)).

Dust devils ontstaan in het algemeen boven warme, droge oppervlakken, maar ze zijn ook waargenomen in subarctische gebieden (o.a. door Wegener). Het zijn lagedruk vortices met een sterke spiraalvormige opwaartse stroming rondom een kern met daarin een dalende luchtstroom. De temperatuur in de stijgende tak is 4 tot 8 K warmer dan de omgeving. Typische verticale windsnelheden zijn 3- 6 m/s. Drukvariaties binnen een stofhoos zijn 2.5 - 4.5 hPa. Hun diameter varieert van 1 tot 50 m en ze kunnen een zichtbare hoogte van meer

dan 500 m bereiken. De niet zichtbare (stofvrije) tak kan waarschijnlijk de top van de atmosferische grenslaag (hoogte eerste inversie) bereiken.

Stofduivels zijn te klein en leven te kort om de rotatie van de aarde te 'voelen'. Hun rotatie ontlenen zij mogelijk aan inhomogeniteiten in de ruwheid van het oppervlak. Ze roteren even vaak links- als rechtsom. Er zijn waarnemingen bekend waarbij de rotatierichting plotseling verandert, nadat een hoos een bosrand raakte. Voor stofhozen geldt *cyclostrofisch evenwicht*, wat leidt tot een eenvoudige relatie tussen tangentiële (horizontale) windsnelheid en het luchtdrukverschil tussen de kern en de omgeving.

De omstandigheden waaronder stofhozen het meest waarschijnlijk zijn is beschreven door Hess en Spillane (1990). Als criterium geven zij  $|h/L| > 50$ , waarbij  $h$  de grenslaaghoogte is en  $L$  de *Obukhov-lengte*.  $L$  is een maat voor de stabiliteit vlak bij de grond. Onder onstabiele omstandigheden is  $L$  (per definitie) negatief. Is het zeer onstabiel (sterke afname van de potentiële temperatuur met de hoogte en weinig wind) dan is  $-L$  klein, zeg 10 meter. Als het bijna neutraal is (potentiële temperatuur neemt weinig af met hoogte, hoge windsnelheid) dan wordt  $-L$  zeer groot, zeg 100000 m). De grenslaaghoogte varieert typisch tussen 0.5 en 5 km. Het gemiddeld aantal stofhozen per km<sup>2</sup> vertoont door de afhankelijkheid van de stabiliteit een duidelijke dagelijkse gang. Dit wordt gedemonstreerd in figuur 1, die is gebaseerd op waarnemingen van Sinclair (1969) in the Avra Valley, Artizona, VS.

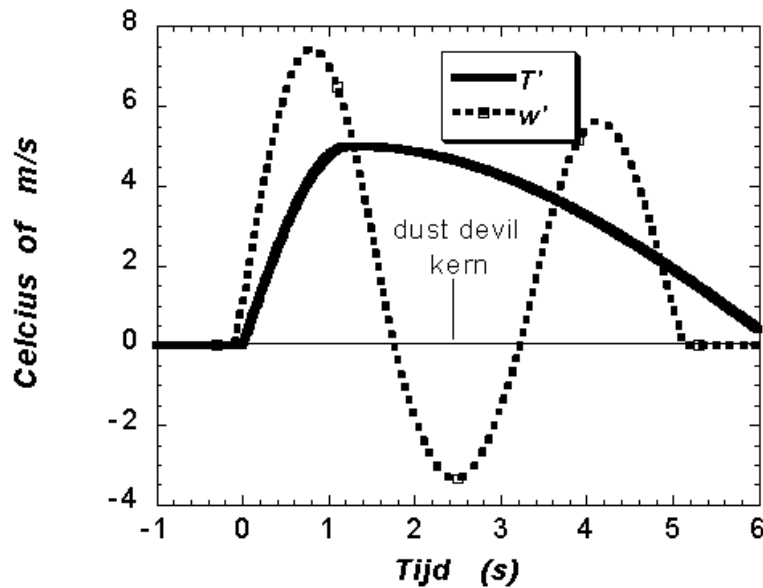


**Figuur 1.** Dagelijkse gang van het gemiddeld aantal waargenomen stofhozen per uur in de Avra Valley, Arizona.

Renno et al. (1998) presenteren een eenvoudig thermodynamisch model voor stofhozen en geven een relatie tussen de energie die beschikbaar is om de hoos aan te drijven,  $H_a$ , als functie van de voelbare warmtestroom aan het aardoppervlak,  $H$  (beide uitgedrukt in  $Wm^{-2}$ ):  $H_a = \eta H$ , waarin  $\eta$  ( $\approx 0.08$ ) de *efficiency* van een 'atmosferische' warmtemotor is.

Detailmetingen aan stofduivels met snelle temperatuur- en windsensoren (eddy-correlatieapparatuur) zijn schaars. Kaimal en Businger (1970) 'vingen' er één in Kansas en Schill (1995) op de hoogvlakte van La Mancha in Spanje. In figuur 2 is schematisch weergegeven wat deze auteurs vonden. In deze figuur is het verloop gegeven in de tijd bij passage van een stofhoos van de temperatuur- ( $T'$ ) en de verticale windsnelheidsfluctuaties ( $w'$ ), d.w.z. fluctuaties t.o.v. van hun gemiddelde achtergrondwaarden. Typerend voor een stofhoos is de grote temperatuursprong tot 8 K en de tekenomslag van  $w'$ , d.w.z. eerst positief (opwaarts), in de kern negatief (neerwaarts), en dan weer positief. Kaimal en

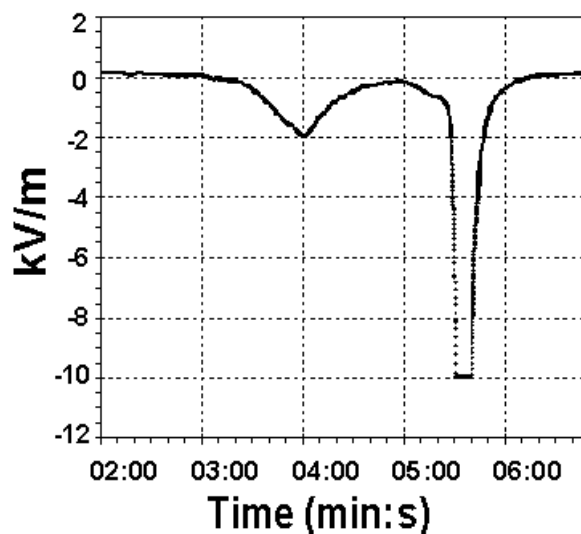
Businger (1970) en Schill (1995) hebben ook metingen van verticale warmte- en impulsstroom verricht. Daarover later meer als wij onze eigen waarnemingen presenteren.



**Figuur 2.** Schematisch verloop van de fluctuaties van de verticale wind ( $w'$ ) en temperatuur ( $T'$ ) bij de passage van een stofhoos.

### Elektrische aspecten

In het algemeen zijn stofdeeltjes elektrisch geladen. Door het sterke verticale stoftransport treedt daarom scheiding van elektrische lading op binnen een stofhoos, met als gevolg dat het lokale elektrische veld sterk wordt beïnvloed. In figuur 3 zijn metingen van het elektrische veld weergegeven voor, tijdens en na de passage van een stofhoos. Te zien is dat onder ongewijzigde omstandigheden het gemiddelde elektrische veld positief is (ongeveer +100 V/m), maar dat in de kern van de stofhoos waarden tot - 10000 V/m worden bereikt.



**Figuur 3.** Het elektrische veld bij de passage van een stofhoos (Renno et al., 2004).

Op Mars zijn dust devils veel groter en krachtiger dan op aarde. Martiaanse duivels hebben een diameter van 100-1000 m en bereiken een hoogte tot 10 km. De Pathfinder heeft 700 maal een stofduivel waargenomen. Veel informatie is op Internet te vinden (bijv. <http://antwarp.gsfc.nasa.gov/apod/ap000317.html>). Martiaanse dust devils hebben een veel hoger stofgehalte dan die op aarde en zij bouwen daarom een veel groter elektrisch veld dan hun aardse neefjes. Men heeft berekend dat in de Martiaanse atmosfeer op deze manier elektrische velden kunnen worden gecreëerd die groter zijn dan de doorslagspanning. Er kan daar dus bliksem ontstaan bij onbewolkte hemel. Stofduivels worden derhalve vuurspuwers en kunnen dus op Mars dust dragons worden genoemd!

## HET MATADOR 2002 VELDEXPERIMENT

MATADOR 2002 vond plaats van 15 mei tot 10 juni van dit jaar nabij het plaatsje Eloy halverwege Tucson en Phoenix in Arizona (VS). Figuur 4 geeft een beeld van het terrein: vlak, droog en kaal. Op deze foto is een deel van de apparatuur te zien alsmede één van de waargenomen stofduivels. In nauwe samenwerking met Chris Watts en Jaime Garatuza van IMADES (Mexico) werden er 4 eddy-correlatiesystemen opgesteld, bestaande uit een sonische anemometer, die tevens temperatuurfluctuaties kan meten en een snelle hygrometer. Op één locatie werd een snelle  $H_2O-CO_2$ -sensor geplaatst. Deze sensoren werden met 20 Hz bemonsterd. De apparatuur bestond verder uit een scintillometer, sensoren voor het meten van de 4 componenten van de nettostraling, de bodemwarmtestroom en infrarood- en bodemthermometers. De universiteit van Berkeley en het Jet Propulsion Laboratory hadden apparatuur voor het meten van atmosferische elektriciteit opgesteld. De universiteiten van Oklahoma en Massachusetts hadden hun mobiel radarsysteem (zie figuur 5) ingezet. Tenslotte had een Canadees bedrijf een Lidar ter beschikking gesteld.



**Figuur 4.** het meetterrein in Arizona (VS). Op de foto is een deel van de apparatuur te zien alsmede één van de waargenomen stofduivels.

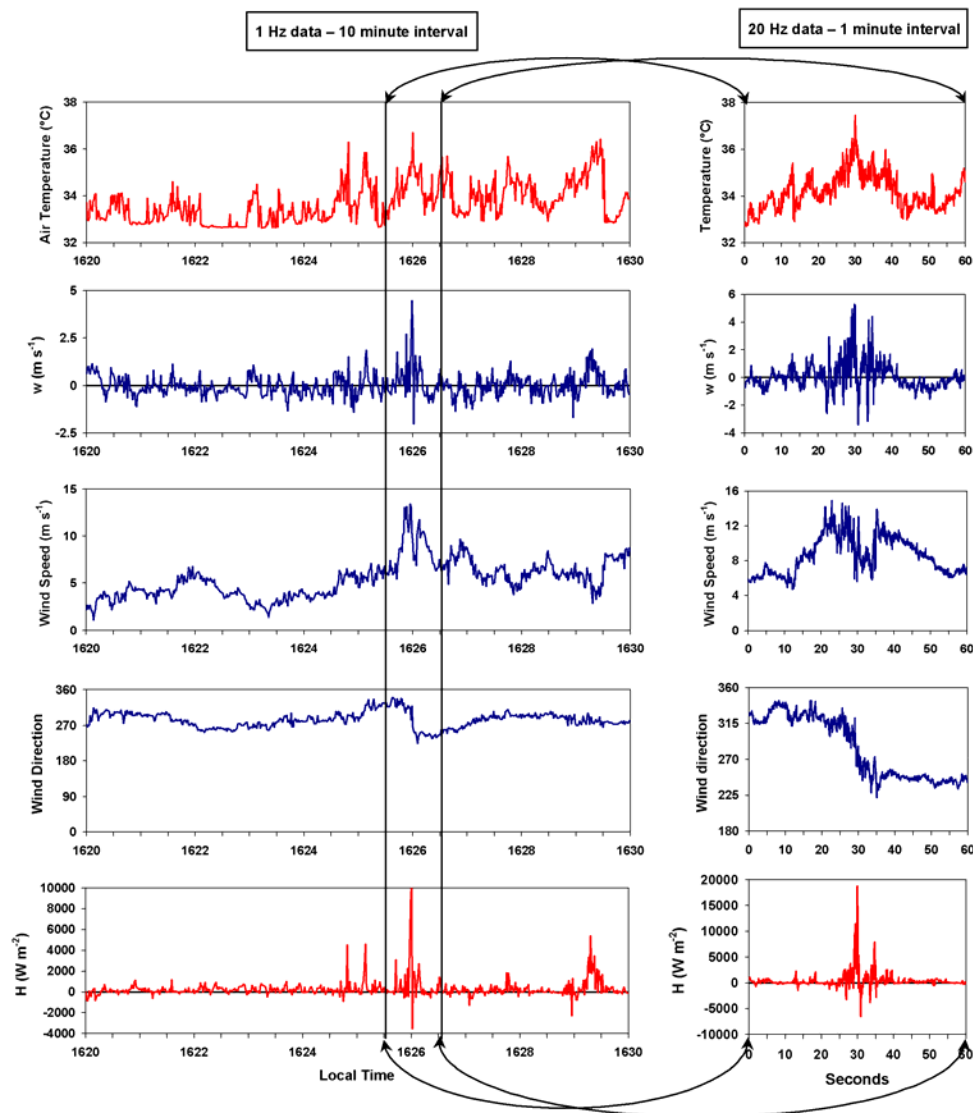


**Figuur 5.** het mobiel radarsysteem van de universiteiten van Oklahoma en Massachusetts.

## Enkele resultaten

Tijdens de meetcampagne werden verschillende dust devils waargenomen, waarvan enkelen door onze meetopstelling trokken. Inmiddels zijn de eerste resultaten van het MATADOR-2002-veldeperiment gepubliceerd (Renno et al., 2004). Hier tonen we enkele resultaten van waarnemingen door ons verzameld. In figuur 6 is de registratie te zien een kleine dust devil die op 24 mei door onze sensors trok. Deze figuur is een samengesteld plaatje met waarnemingen van de temperatuur, verticale windsnelheid ( $w$ ), horizontale windsnelheid, windrichting ( $WD$ ) en voelbare warmtestroom ( $H$ ). Per variabele zijn twee panelen gegeven. Het linker paneel betreft 1 Hz data (1 data punt per seconde) voor een periode van 10 minuten waarin goed het verschil is waar te nemen tussen de gemiddelde

toestand van de atmosfeer voor dat tijdstip en de passage van de dust devil. Het rechter paneel omvat een periode van 1 minuut binnen die 10 minuten die inzoomt op de passage. Hier worden 20 Hz data getoond en hierin zijn goed een aantal karakteristieke eigenschappen van een dust devil terug te vinden.



**Figuur 6.** Dust devil passage op 24 mei 2002. De volgende variabelen zijn gegeven: temperatuur, verticale windsnelheid ( $w$ ), horizontale windsnelheid, windrichting ( $WD$ ) en voelbare warmtestroom ( $H$ ). De panelen rechts geven een uitvergroting tijdens het moment van de passage.

De atmosferische condities waarin deze dust devil werd waargenomen waren warm, (ca  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) en droog (de dichtheid van waterdamp  $< 3\text{ g m}^{-3}$  overeenkomend met een relatieve vochtigheid van ca  $8\%$ ) en er stond een niet al te krachtig wind van  $\sim 5\text{ m s}^{-1}$ . Het warmtetransport ( $H$ ) voor dit 10-minuten interval bedroeg  $180\text{ W m}^{-2}$ .

In het ideale geval waarin de dust devil recht over de sensors zou zijn getrokken zou men in de ingezoomde plaatjes het volgende beeld verwachten. Eerst trekt de voorste begrenzing van de dust devil langs met sterke stijgende bewegingen, een toename van de horizontale windsnelheid en een plotselinge verandering van de windrichting. Vervolgens passeert de relatief rustige kern, met dalende bewegingen, lagere horizontale windsnelheid en door het

mindere warmtetransport vanaf het oppervak ook iets lagere temperaturen. Tenslotte trekt de de achterste dust devil rand langs met dezelfde karakteristieken als de voorzijde, met dat verschil dat de wind ten opzichte van de eerste randpassage 180° gedraaid is.

De door ons waargenomen dust devil vertoont in grote lijnen het hierboven geschetste beeld. Hij trok helaas niet recht over ons meetsysteem heen, hetgeen blijkt uit de windrichting die niet een volledige 180° draaiing maakt. De metingen zijn er niet minder spectaculair om: een toename in temperatuur van 3 °C, de horizontale windsnelheid gaat van 5 naar 15 m s<sup>-1</sup>, de verticale windsnelheid die gemiddeld over langere periode - zeg 1 uur - 0 m s<sup>-1</sup> moet zijn (anders "verdwijnt" er lucht) haalt snelheden van meer dan 5 m s<sup>-1</sup>. Het warmtetransport schiet omhoog van 180 W m<sup>-2</sup> naar wel 8000 W m<sup>-2</sup>. Hier blijkt overduidelijk uit dat dust devils zeer efficiënte warmtetransporteurs in de atmosfeer zijn. De kern van de dust devil met deels negatieve verticale windsnelheid, en daardoor ook negatieve  $H$  (warmtetransport van de atmosfeer naar het oppervlak toe) en lagere windsnelheid en temperatuur is ook duidelijk te onderscheiden.

### **Literatuur**

Hess and Spillane, 1990: *J. Appl. Met.*, 498-507.

Kyriazopoulos, 1995: *Publ. Met. Inst. Univ. Thessaloniki* 4.

Kaimal en Businger, 1970: *J. Appl. Met.*, 612-620.

Renno et al., 2004: *J. Geophys. Res.*, 105, paginanrs nog niet bekend.

Schill, 1995: Seminararbeit Inst. für Met. und Klimaforschung, Univ. Karlsruhe.

Sinclair, 1969: *J. Appl. Met.*, 32 - 45.