Henk de Bruin en Huug van den Dool

Henk de Bruin studeerde natuurkunde aan de UvA en was van 1970 tot 1985 wetenschappelijk hoofdmedewerker bij het KNMI. Hij promoveerde aan de Wageningen Universiteit, waar hij tot 2007 werkzaam was, en is nu freelanceronderzoeker. Huug van den Dool werkte van 1975 tot 1982 als onderzoeker op het KNMI en daarna in de VS, recentelijk bij het Climate Prediction Center in Washington DC. Reacties: Henk de Bruin, **hardb@xs4all.nl**.

Figuur 1: windhoos waargenomen in Mexico (Foto: Arnold Moene)

Stofhozen

Je bent astronaut, op weg naar Mars en je hebt net een ruimtereis van meer dan twee jaar achter de rug. Je Marsvoertuig maakt een perfecte landing, precies op de geselecteerde locatie. En dan gebeurt het: je wordt getroffen door een Martiaanse stofhoos. Windsnelheden nemen plotseling sterk toe, stof zandstraalt je voertuig en sterke elektrische velden verbreken het radiocontact met aarde. Over het algemeen zijn stofhozen op aarde minder extreem, maar een klein vliegtuig in Australië crashte nadat het in botsing was gekomen met een stofhoos. Dit ongeval maakte duidelijk dat ook de kleine luchtvaart gevaar loopt. Ruimtevaartorganisaties hebben ook belangstelling voor stofhozen omdat ze op Mars voorkomen. Kortom: redenen genoeg om eens aandacht te besteden aan deze 'mooiweertornado's'. In dit artikel wordt onder meer het stofhozenonderzoek besproken waarbij de eerste auteur betrokken was, maar ook komen resultaten van een recenter onderzoek aan de orde.

Modelstudies tonen aan dat wervelstructuren zoals stofhozen kunnen ontstaan boven stofvrije droge oppervlakken, zoals bossen en bebouwde gebieden. Deze zijn dan niet zichtbaar voor het menselijke oog, maar wel waarneembaar met speciale apparatuur. Tevens heeft recent onderzoek aangetoond dat stofhozen efficiënte transporteurs van warmte en stof zijn. Dit aspect wordt nog niet beschreven in de huidige meteorologische modellen voor weer en klimaat.

Stofhozen zijn wervels met een lage druk en een sterke spiraalvormige opwaartse stroming rondom de kern. In de kern zelf heerst een dalende luchtstroom. De wervelstructuur wordt zichtbaar door stof. De temperatuur in de stijgende tak is 4 tot 8 K hoger dan de omgeving. De horizontale windsnelheden rondom de kern kunnen waarden van 20 m/s bereiken. Typische verticale windsnelheden zijn 3-4 m/s. Ze verplaatsen zich met snelheden tot ongeveer 10 m/s. Drukverschillen (p) 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 onzichtbare

Figuur 2: voorbeelden van stofhozen. In voorbeeld (d) ontbreekt (nog) een wervelstructuur.

Figuur 3: meerdere stofhozen vlak bij elkaar. Opname gemaakt bij Corvallis, Oregon, VS.

(stofvrije) tak reikt waarschijnlijk hoger. Boven de grond is de kern vaak stofloos. Bodemwrijving zorgt ervoor dat de stroming een component naar de kern toe krijgt, waardoor dit deel van de hoos geheel met stof wordt gevuld.

Er zijn meldingen van een 'botsing' tussen een onzichtbare hoos en een onderzoeksvliegtuig boven boreaal bos, zie MacPherson en Betts (ref. 1). Recent werden met Doppler Lidar[1] onzichtbare hozen boven een stad waargenomen (Fujiwara et al. Ref. 2).

[1] Lidar is een acroniem: Light Detection And Ranging (Detectie van laser licht en afstandsbepaling). Het principe berust op het waarnemen van de Dopplerverschuiving van door aërosolen teruggekaatst laserlicht.

Voorbeelden

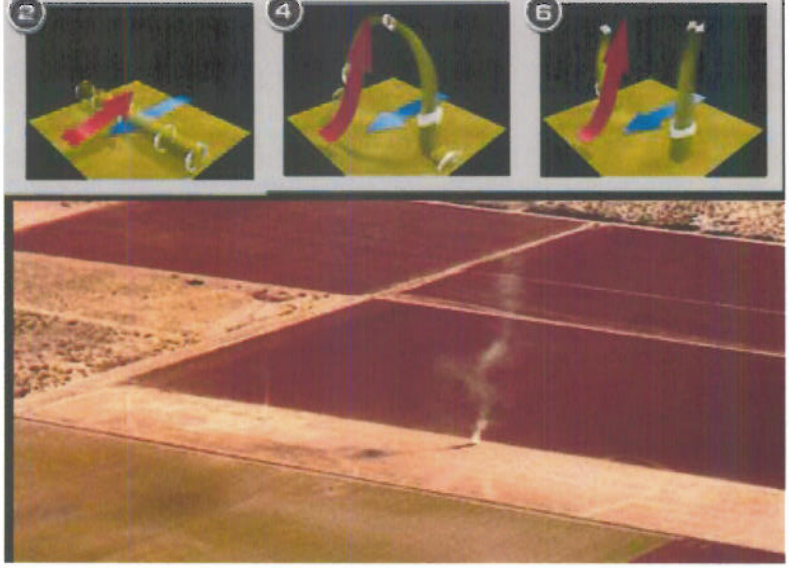
Een voorbeeld van een stofhoos is te zien in figuur 1. Stofhozen zijn onderling zeer verschillend en soms zijn ze zeer slecht ontwikkeld (figuur 2). Geregeld kunnen zich meerdere stofhozen vormen boven één veld (figuur 3).

De stofhoos, ook wel zandhoos genaamd, is het kleinste lid van een familie van vertikaal staande, geïsoleerde atmosferische wervelwindverschijnselen, zoals tornado's, waterhozen, stoomhozen en vuurwervels. Atmosferische wervels op grotere schaal zijn *Polar Lows*, extratropische cyclonen en tropische cyclonen. Een vuistregel is: hoe groter het systeem, des te langer hun levensduur. Stofhozen bestaan relatief kort.

In tegenstelling tot tornado's en waterhozen ontstaan stofhozen bij wolkenloze hemel. Ze komen vaak voor in warme, droge streken, maar ze zijn ook waargenomen boven sneeuw. In Australië worden ze *willy willies* genoemd. Voor een literatuuroverzicht over stofhozenonderzoek verricht in de vorige eeuw verwijzen wij naar Bluestein en Weiss (ref. 3) of Balme en Greeley (ref. 4).

Wanneer ontstaan ze?

Naar aanleiding van een ongeval met een klein vliegtuig in Australië, in de jaren zestig van de vorige eeuw hebben Hess en Spillane (ref. 5) onderzochten onder welke meteorologische omstandigheden stofhozen ontstaan. Op grond van deze studie zijn richtlijnen voor meteorologen opgesteld en sindsdien worden stofhozen in weersrapportages opgenomen. Ze hebben de code *po* (poussière =stof) gekregen (ref. 6). Hess en Spillane vonden dat stofhozen ontstaan wanneer $h/|L| > 50$, waarbij h de hoogte van de atmosferische grenslaag (AGL) is en L the *Obukhovlengte*. De AGL is de onderste luchtlaag die turbulent is (de Bruin & van den Dool, ref. 7). In droge gebieden groeit de AGL overdag na zonsopkomst van ongeveer 100 m, tot 3-4 km in de middag. Atmosferische turbulentie wordt opgewekt door opwarming door het aardoppervlak, gekarakteriseerd door de voelbare warmtestroom (H) en door 'wind en wrijving' gekarakteriseerd door de *wrijvingssnelheid* u_*. Er geldt dat $|L| \propto u_*^3/H$ en dat de grenslaaggroei (dh/dt) evenredig is met $\sqrt{H}$. Dus



Figuur 4: schematische weergave van de wijze waarop stofhozen zouden kunnen ontstaan (boven: drie figuren ontleend aan Renno (persoonlijke communicatie)).

aan het *H&S*-criterium wordt voldaan als H groot is en de windsnelheid klein. Het aantal stofhozen per uur heeft een duidelijke dagelijkse gang.

Oke et al. (ref 8) bestudeerden meer dan 500 willy willies in Australië. Zij vonden dat deze ontstaan als het temperatuurverschil op 12 en 252 cm > 0,9 °C/m en de windsnelheden tussen 1,5 en 7,5 m/s. Ook melden ze dat stofhozen eerder ontstaan boven kale grond dan boven (gedeeltelijke) begroeiing. Dit komt omdat door verdamping de vegetatie afkoelt, waardoor de verticale temperatuurverschillen boven de grond worden verkleind.

Begin 2011 publiceerden onderzoekers uit Chili en Rusland een studie naar stofhozen in de Atacama-woestijn in Chili (Metzgers et al. (ref. 9). Zij bevestigden het H&S-criterium, echter zij rapporteerden, in tegenspraak met de bevindingen van Oke et al., ook stofhozen bij windsnelheden kleiner dan 1,5 m/s. Zij komen met een nieuwe vuistregel: $d=2|L|$, waarin d de diameter is van de stofhoos. De Atacama-woestijn staat in de belangstelling van ruimtevaartinstituten; deze woestijn is de droogste plek op aarde en de daar heersende omstandigheden lijken het meest op die op Mars.

Linksom of rechtsom?

Het blijkt dat stofhozen even vaak linksom als rechtsom roteren. Zij worden dus niet beïnvloed door aardrotatie. Dit kan worden verklaard door voor stofhozen *cyclostrofisch evenwicht* te veronderstellen. Dan is er een evenwicht tussen de centrifugaalkracht (naar buiten gericht) en de drukgradiëntkracht (naar binnen gericht). Per eenheid van massa (dat is een versnelling) is de eerste $a_c = \frac{V^2}{R}$, waarbij V de tangentiele (horizontale) windsnelheid is en R = 0,5d de straal van de hoos. Met V =5 m/s en R =10 m is $a_c \approx 2{,}5 m/s^2$. Dat is veel groter is dan de Coriolis-versnelling a_{cor} ten gevolge van aardrotatie die van de orde 10^{-4} m/s^2 is. Voor grootschalige roterende meteorologische structuren zoals een lage drukgebied is dat anders: dan is R typische 1000 km en dan is $a_{cor} \approx a_c$. Een stofhoos is te klein en leeft te kort om de aardrotatie te voelen.

Waar ontleent een stofhoos zijn rotatie aan? Dat is nog niet helemaal duidelijk. Sommige onderzoekers denken dat ze ontstaan uit een horizontale, langgerekte vortex; deze vortex zou worden gevormd aan de grond, daar waar de wind met de hoogte toeneemt. Deze schering creëert rotatie. Een voorkeursplaats zou de rand van een terreinovergang kunnen zijn. Door opwarming richt de horizontale vortex zich op en breekt vervolgens. In dit model ontstaan er dus twee stofhozen met tegengestelde rotatierichting (zie figuur 4).

Veel stofhozen zijn echter solitair en er zijn waarnemingen waarbij de rotatierichting van een stofhoos plotseling verandert, nadat de hoos een bosrand raakt. Dus er moeten meer mechanismen zijn waaraan een stofhoos zijn rotatie ontleent.

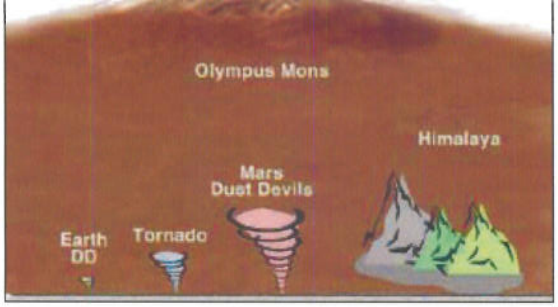
Stofhozen op Mars

Het klimaat op Mars kan kort worden samengevat: veel wind en veel stof . De atmosfeer bestaat voor 95% uit CO_2, de gemiddelde temperatuur is -63 °C (15)*, en het verschil tussen maximum (T_x) en minimumtemperatuur (T_n) is groot, ongeveer 70 graden (<50)*; de luchtdruk is gemiddeld 6,4 hPa (985,4 [9a])*. Het thermische getij (van den Dool en de Bruin, ref. 10) is bijna even groot als op aarde, dit komt door de zeer sterke absorptie van zonlicht in het atmosferisch stof (ref. 11). Omdat Mars verder van de zon verwijderd is, ontvangt hij minder zonnestraling: de zonneconstante van Mars is 590 Wm^{-2} (1367)*. De dichtheid van de Martiaanse atmosfeer nabij het oppervlak is slechts 0,02 Kg m^{-3} (1,2 op aarde)* en de volumetrische warmtecapaciteit is klein 11 J kg^{-1}.m^{-3} (1200 op aarde)*. Derhalve is warmteafgifte van het Marsoppervlak aan de atmosfeer relatief klein (< 20 Wm^{-2}; Tillman et al. [12]). Dus de bodem absorbeert overdag veel warmte. In de nacht moet deze warmte in de vorm van langgolvige straling weer worden afgegeven. Dit verklaart het enorme verschil tussen T_x en T_n op Mars. De effectieve dikte van een planetaire atmosfeer is de *schaalhoogte* $H_s = RT/g$, waarin R de specifieke gasconstante is, T de absolute temperatuur en g de zwaartekrachtversnelling. Voor Mars is R = 190 J kg^{-1} K^{-1} en g = 3.7 m s^{-2}. Op Mars is h_s ca 11 km (8 km)*. Al deze factoren leiden er toe dat stofhozen op Mars een hoogte van ca 10 km kunnen bereiken (figuur 5). Martiaanse duivels hebben een diameter van 100-1000 m. Op satellietfoto's zijn duidelijk sporen te zien van stofhozen. Ze hebben ook een veel hoger stofgehalte dan hun broeders op aarde. Het blijkt dat stofhozen veel voorkomen in Amazonis (25–45°N, 145–165°W) en in Causius (45–65°N, 255–285°W). In deze streken komen ook de grootste voor. Op Mars worden ook vele stofstormen waargenomen op regionale en grote schaal. Terug op aarde: tijdens het schrijven van dit artikel trof zo'n stoffront delen van Arizona.

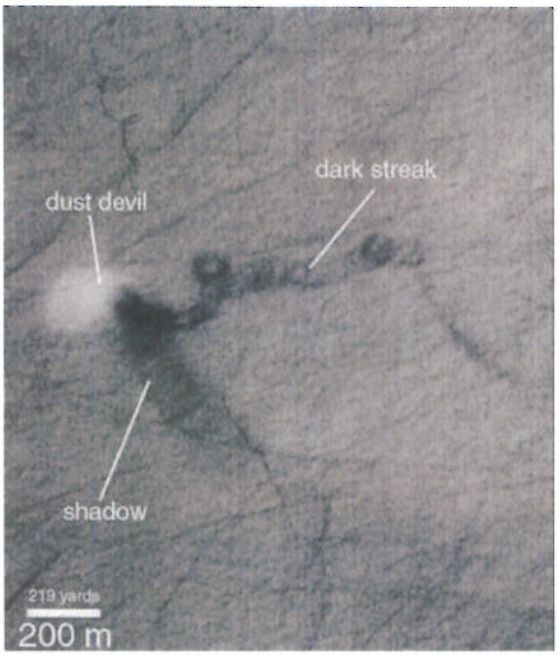
De eigenschappen van Martiaanse stofhozen zijn samengevat in tabel 1. Merk op dat de Beagle 2 van ESA een speciale windsensor aan boord had, ontworpen voor stofhozenon-

h_s

* getal in ( ) is voor planeet Aarde. Zie ook Tabel 1 voor vergelijking Mars (Aarde).



Figuur 5: schets van de grootte van stofhozen op aarde en op Mars



Figuur 6: spoor en schaduw van een Martiaanse stofhoos, waargenomen met een satelliet.

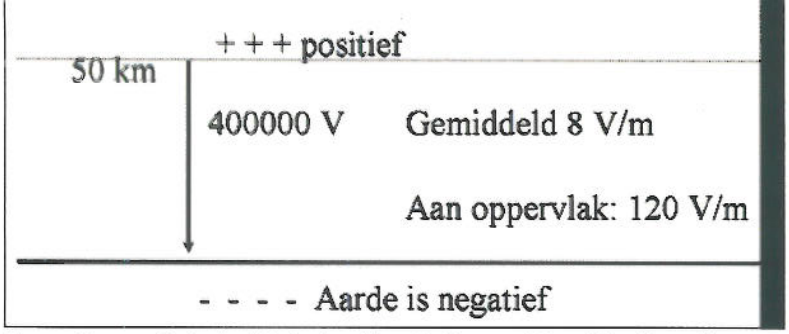
Algemeen:	***aarde***	***Mars***
Gemiddelde temperatuur (°C)	15	-63
T_{max} -T_{min} (°C)	<50	70
druk (hPa)	985,4	6,4
dichtheid (kg.m^{-3})	1,2	0,02
vol. warmtecapaciteit (J.m^{-3})	1200	11
droogadiabaat (K per 100m) (maat voor stabiliteit, groter =stabieler)	1	0,5
spec. gasconst. R (J.kg^{-1}.K^{-1})	290	190
schaalhoogte (km)	8	11
Versnelling zwaartekracht (m/s^2)	9,81	3,7
Zonneconstante W/(m*m)	1367	590
Windhozen		
windsnelheid	tot 20 m/s	tot 70 m/s
Δp	2,5 – 4,5 hPa	10 – 45 Pa
ΔT	4-8 K	1-5 K
Stof deeltjesgrootte	10-40 μm	3-5 μm
tijdstip lokale tijd	10:00 – 16:00	10:00 – 16:00

Tabel 1: eigenschappen en parameters van Aarde en Mars. Eerst algemene eigenschappen, onderste helft eigenschappen specifiek van windhozen.

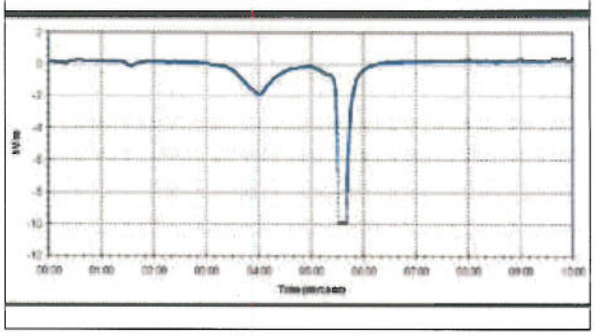
Achtergrondinformatie

De eerste auteur is jarenlang betrokken geweest bij micro- en hydrometeorologisch onderzoek in *semi-aride* gebieden: in deze gebieden is tijdens de regentijd een neerslag van 100 mm per dag geen extremiteit, en in de droge tijd valt er vaak maandenlang geen druppel water.

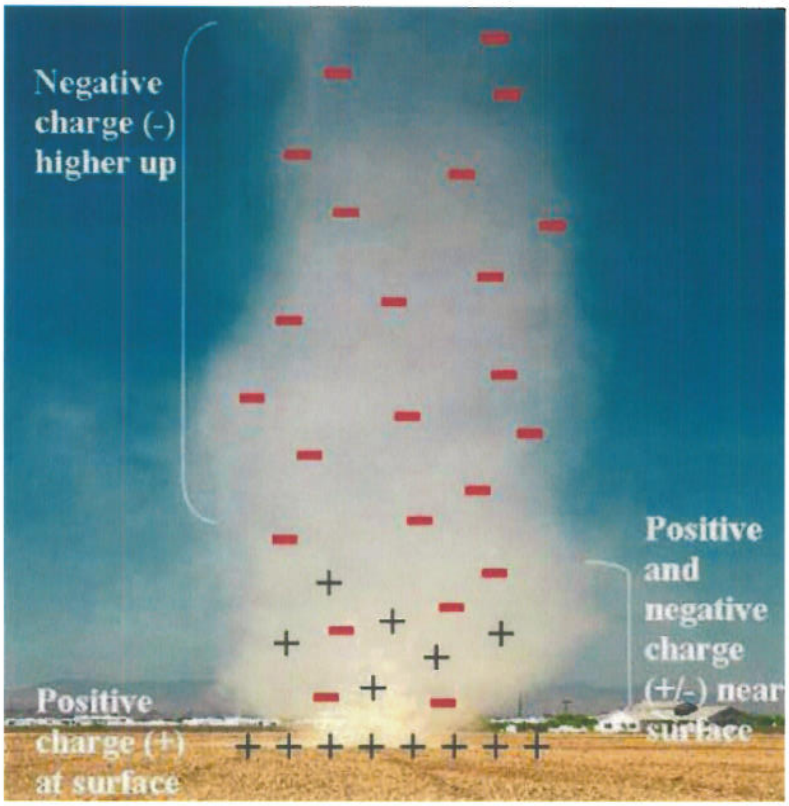
Voor het bedrijven van landbouw is een neerslagsom van 300 mm per jaar nodig. Dat betekent dat een kleine klimatologische verandering van het neerslagpatroon enorme gevolgen heeft. Verschuiving naar de natte kant betekent substantieel hogere gewasopbrengsten, maar verschuiving naar de droge kant betekent hongersnood. Het onderzoek richtte zich op uitwisselingsprocessen van onder meer warmte, waterdamp (verdamping) en CO_2. Tijdens meetcampagnes werden geregeld stofhozen waargenomen waarvan kon worden verwacht dat zij lokaal veel warmte de atmosfeer inpompen. Omdat de kans dat een stofhoos door klassieke meetapparatuur wordt gedetecteerd klein is, is het niet bekend wat de procentuele bijdrage aan het totale warmtetransport door windhozen is. Als dit percentage niet verwaarloosbaar is, wordt de warmteuitwisseling in semi-aride gebieden onvolledig beschreven. En daarmee hebben we een wetenschappelijke doelstelling om stofhozen te gaan bestuderen. Maar naast wetenschappelijke belangstelling is er ook de fascinatie voor het verschijnsel zelf; aangewakkerd door eigen waarnemingen. Op de vlakte van La Mancha zag de auteur een stofhoos voor Don Quichote' windmolens en in New Mexico kwam het busje waarin hij zat in botsing met een stofhoos. Tijdens hetzelfde veldwerk werden deze 'dust devils', zoals stofhozen in de VS heten, dagelijks waargenomen. In Thessaloniki vond hij in één van de kapitelen van de Agia Sophia een byzantijnse sculptuur van een stofhoos. Later was zijn toenmalige Wageningse onderzoeksgroep betrokken bij het MATADOR-project (ref. 15) dat geheel gewijd was aan stofhozen.



Figuur 7: atmosferisch elektrisch veld en ladingverdeling bij onbewolkt weer



Figuur 9: gemeten elektrisch veld bij passage van een stofhoos.



Figuur 8: ladingverdeling in een stofhoos

derzoek (ref. 13). Helaas mislukte dit ruimtevaartproject. Martiaanse stofhozen inspireren onderzoekers tot het ontwikkelen van nieuwe meettechnieken. Een voorbeeld is windwaarnemingen met de HiRISE-camera. ontwikkeld door de universiteit van Arizona (ref. 14).

Elektrische velden

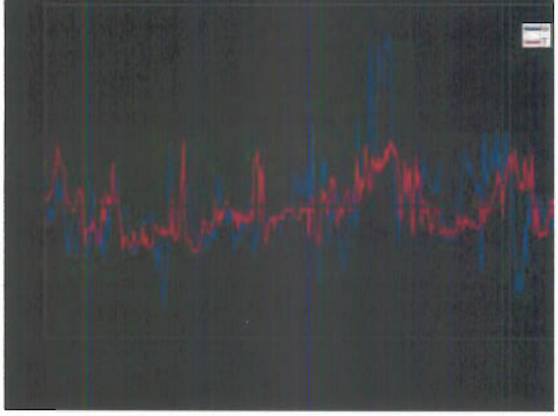
Over het algemeen heerst er in de aardse atmosfeer een elektrisch veld. Bij mooi weer is dit nabij het oppervlak ongeveer 120 V/m (figuur 7). Dan is het oppervlak negatief geladen. Echter, stofdeeltjes zijn elektrisch geladen en in stofhozen heerst daarom een andere elektrische verdeling. In figuur 8 is het positief geladen oppervlak geïllustreerd. In figuur 9 is het veld weergegeven bij stofhoospassages (ref. 15). In de kern van de hoos werd een veldsterkte van -10000 V/m gemeten. Dit is dus meer dan 80 maal sterker dan bij mooi weer, bovendien met een ander teken. Omdat de doorslagspanning van de aardse atmosfeer ongeveer 3 miljoen V/m is, kan een stofhoos geen bliksem veroorzaken. Enige jaren geleden had men berekend dat de doorslagspanning op Mars ongeveer 20 kV/m zou zijn, maar recent heeft een Nederlandse onderzoeker, Jasper Kok, aangetoond dat de doorslagspanning daar ongeveer 43 kV/m is, en dat deze veldsterke in Martiaanse stofhozen niet wordt bereikt. In het maartnummer van *Zenit* werd reeds gemeld dat gedurende 5 jaar van metingen met de Mars Express geen bliksem op Mars is waargenomen. Het werk van Jasper Kok wordt daarmee bevestigd. Merk op dat bliksem in stofwolken wel op aarde wordt waargenomen tijdens vulkaanuitbarstingen. Op internet is een filmpje te vinden van de uitbarsting van een vulkaan in Puyehue-Cordón Caulle in Chili op 5 juni 2011.

Even terzijde: Jasper Kok's proefschrift handelt ook over elektrische krachten die stof aan het op-

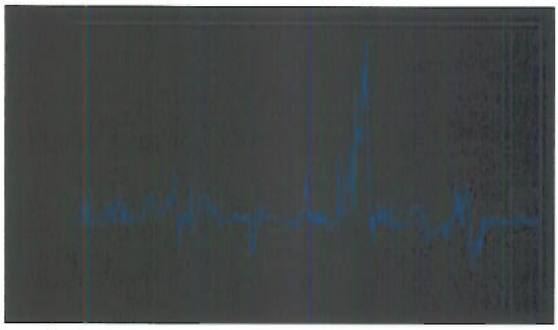
Het MATADOR-veldexperiment

De veldcampagne Martian ATmosphere And Dust in the Optical and Radio (MATADOR) werd gehouden van 15 mei tot 10 juni 2002 bij Eloy in Arizona (VS). De onderzoeksgroep van de Wageningen Universiteit, geleid door de eerste auteur, stelde in samenwerking met een groep uit Mexico 4 sonische anemometers op, die tevens temperatuurfluctuaties kunnen meten (ref. 15), zie figuur 12. In figuur 11 is de 20-secondregistratie van de verticale windsnelheid w en de temperatuur T weergegeven tijdens een stofhoospassage. Een accent betekent 'afwijking van het 10-minutengemiddelde'. Te zien is dat w' plotseling sterk toeneemt tot +6 m/s. In figuur 12 is ook de verticale voelbare warmtestroom (H) geplot. Tijdens stofhoospassage is deze bijna 8000 Wm^{-2}. Gemiddeld over deze 20 minuten was H 381 W/m^2. Stofhozen zijn dus zeer efficiënte warmtetransporteurs in de atmosfeer! Waarnemingen in de jaren 1960 in de VS en Spanje door een Duitse groep bevestigen dit (ref. 15).

Figuur 10: opstellen van sonische anemometers door Oscar Hartogensis en Dirk Schuttemeyer van de Wageningen Universiteit en Chris Watts van IMADES tijdens MATADOR-experiment. Op de achtergrond is een stofhoos zichtbaar.



Figuur 11: fluctuaties van de verticale windsnelheid (*w'*) en temperatuur (*T'*) tijdens de passage van een stofhoos tijdens het MATADOR-experiment. (Met dank aan Oscar Hartogensis).



Figuur 12: voelbare warmtestroom *H*, gemeten tijdens de passage van een stofhoos. De gemiddelde waarde van *H* over 10 minuten, waarbinnen het getoonde tijdsinterval viel, was 381 *W* m-².

met zijn collega Nilton Renno heeft hij aangetoond dat deze elektrisch krachten stof op de maan kunnen optillen.

Conclusie

Stofhozen zijn deels nog onbegrepen. Op aarde vormen zij een gevaar voor de kleine luchtvaart in droge streken. Ze transporteren zeer efficiënt warmte. Er zijn aanwijzingen dat in semi-aride gebieden het aantal stofhozen per km² groot kan zijn. In dat geval kunnen ze een belangrijk deel aan het totale warmtetransport bijdragen. Mogelijk moeten dan huidige meteorologische computermodellen worden aangepast.

Voor het oog onzichtbare hozen zijn met lidar waargenomen boven bossen en steden. Het criterium van Hess en Spillane is recent bevestigd. Op Mars zijn stofhozen groter en intensiever dan op aarde en vormen ze een gevaar voor eventuele astronauten. De Nederlander Jasper Kok heeft aangetoond dat bliksem in Martiaanse stofhozen onwaarschijnlijk is, een welkome meevaller voor een reis met die toch al veel risico's met zich meebrengt.

Stofhozen op You Tube

Op You Tube zijn verschillende amateurfilmpjes te vinden van stofhozen. Het typen van het trefwoord dust devils levert vele hits op. Voor een 'playlist' van stofhozen zie http://www.youtube.com/playlist?p=PL6A8F94B510D7E9BF

Referenties

1. Mac Pearson and Betts, *J. Geophys. Res.*, 1997, 231 -234.
2. Fujiwara e.a., 7th nt. Conf. Urban Climate, 2009, Ykohama.
3. Bluestein and Weiss, *Month. Weath. Rev., 2004*, 209-224.
4. Balme and Greekey, *Rev. of Geophysics*, 2006, 1-22.
5. Hess and Spillane, *J. Appl. Meteor.*, 1990, 498-507.
6. Code voor stofhozen, WMO.
7. de Bruin en van den Dool, *Zenit*, april 2011.
8. Oke et al., *J. of Arid Env.*, 2007, 201-215
9. Metzger, *Lunar and Planerary Science Conference*, Texas, 2010.

9a van den Dool en de Bruin, *Zenit*, oktober 2010.

10. van den Dool en de Bruin, *Zenit*, maart 2011.
11. Wilson and Hamilton, *J. of Atm. Sci.*, 1996, 1290- 1326.
12. Tillman e.a., *J. of Atm. Sci.*, 1994, 1709-1727.
13. Ringrose e.a. 32nd Lunar and Planerary Science Conference, Texas, 2001.
14. Choi et al. 42nd Lunar and Planerary Science Conference, Texas, 2011.
15. Renno e.a., *J. of Geoph. Res.*, 2004.