

Lucht zien stromen op satellietbeelden

KEES FLOOR

Lucht kun je niet zien en luchtstromingen evenmin. Toch kunnen we uit satellietbeelden geregeld concluderen dat er lucht beweegt en in welke richting deze zich verplaatst. Meestal dient bewolking als 'tracer', maar er zijn ook andere mogelijkheden. Als voorbeeld dienen de lijwervels en andere eilandeffecten achter Madeira, de Canarische en de Kaapverdise Eilanden.

Wervelstraten achter vulkanische eilanden behoren tot de indrukwekkendste patronen die op satellietbeelden kunnen worden waargenomen (zie afbeeldingen). De eilanden vormen een obstakel in een vaak strakke luchtstroming. De lucht die komt aanwaaien, moet over het eiland heen of erlangs. In het laatste geval is het eiland hoger dan de maritieme grenslaag dik is en prikt het dus door de inversie aan de bovenkant van de grenslaag heen. Er ontstaan dan afwisselend aan de linkerzijde en aan de rechterzijde van het obstakel wervels, die loslaten en vervangen worden door een nieuwe wervel. Zo vormt zich een patroon dat bestaat uit twee bijna evenwijdige rijen wervels met tegengestelde draairichtingen.

Een dergelijk stromingspatroon staat ook

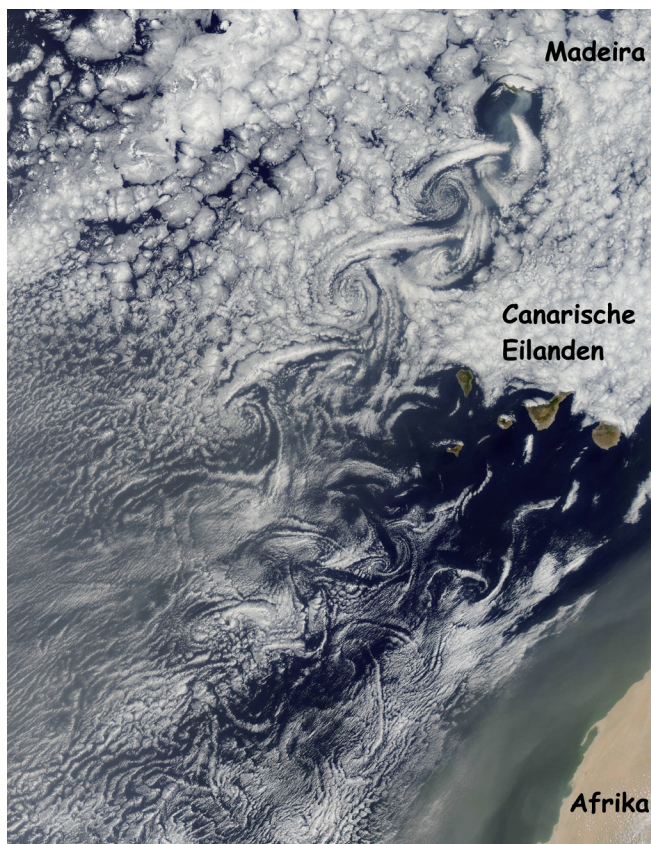
wel bekend als "wervelweg van Von Kármán", naar de Hongaarse fysicus die in 1911 voor het eerst een wiskundige beschrijving gaf van het verschijnsel. Sinds 1962 kennen we het begrip ook in de meteorologie. In dat jaar legde de Amerikaanse weersatelliet Tiros V wervelstraten voor de eerste maal vast. Satellieten zijn onontbeerlijk om het patroon te kunnen waarnemen. De wervels zijn namelijk te klein om op weerkaarten op synoptische schaal opgemerkt te kunnen worden en tegelijkertijd te groot om herkenbaar te zijn voor een waarnemer op het aardoppervlak. Tegenwoordig zijn de Von Kármánwervels ook terug te vinden in fijnmazige atmosfermodellen.

Bewolking

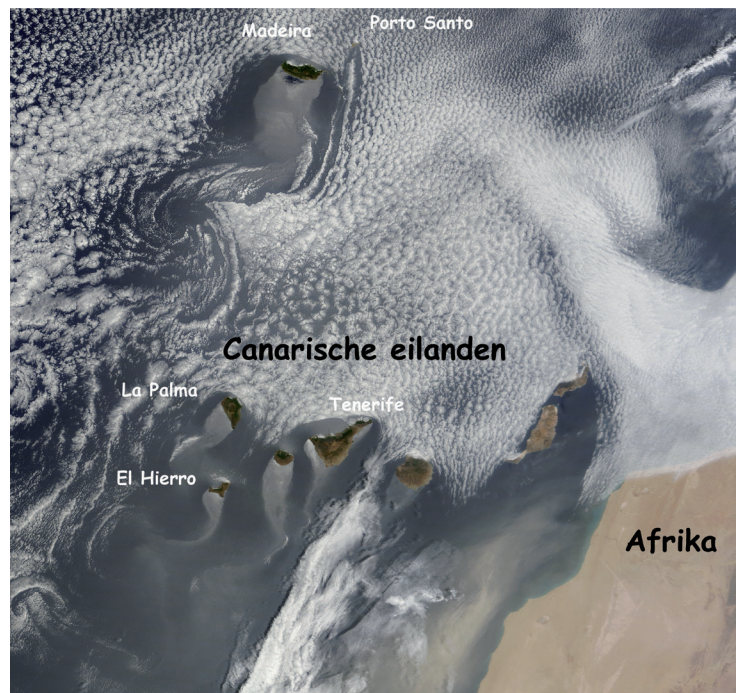
Als het op de eilanden onbewolkt is en er ook in de wijde omgeving boven zee geen bewolking voorkomt, zijn eventuele wervels niet zichtbaar

op satellietbeelden. Het is de zich elegant naar de heersende luchtstroming voegende bewolking die het in bijna alle overige gevallen mogelijk maakt de aanwezigheid van wervels vast te stellen. In de subtropen liggen de zichtbare wervelpatronen doorgaans in uitgestrekte stratocumulusvelden. Dat is bijvoorbeeld het geval in de Atlantische Oceaan bij Madeira (Portugal), de Canarische Eilanden (Spanje) (figuren 1 en 2) en Kaapverdië (figuur 3). In de Grote Oceaan treden bij Guadalupe (Mexico) en de Revillagigedo-eilanden (Mexico) wervels op onder vergelijkbare omstandigheden (niet afgebeeld). Meer richting de polen onderbreken de wervels meestal een strak wolkenstratenpatroon in koude, over de oceaan uitstromende Arctische lucht. Dat zien we geregeld achter Jan Mayen (Denemarken) in de Atlantische Oceaan en achter de Aleoeten (Alaska, VS) in de Grote Oceaan (niet afgebeeld).

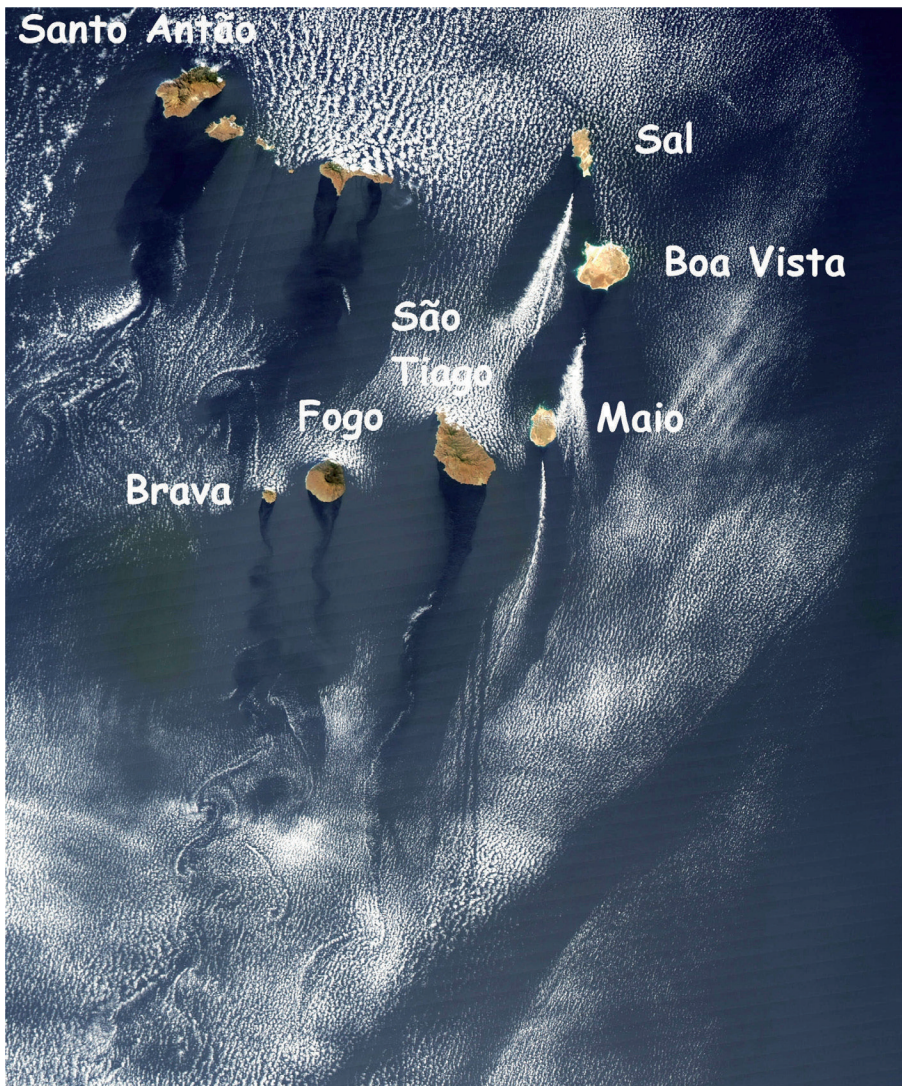
De gesloten cellen in de stratocumu-



Figuur 1. Wervelstraten van Von Kármán achter Madeira en de Canarische Eilanden, 14 augustus 2010. Op Madeira woeden natuurbranden; de rookpluim is goed zichtbaar, vooral op de uitvergroting van figuur 6. Boven de Atlantische Oceaan voor de Afrikaanse kust zweeft Saharastof. Instrument: MODIS. Satelliet: Aqua. Bron: NASA/GSFC, MODIS Rapid Response.



Figuur 2. Wervelstraten van Von Kármán achter Madeira en de Canarische Eilanden, 25 juli 2010. Boven de Atlantische Oceaan voor de Afrikaanse kust zweeft Saharastof. Het wateroppervlak in de luwte achter Madeira en de Canarische Eilanden heeft door zonneginstering een lichte tint. Stroomafwaarts van Porto Santo, een klein eiland ten noordwesten van Madeira, is een wolkenpluim zichtbaar. Instrument: MODIS. Satelliet: Terra. Bron: NASA/GSFC, MODIS Rapid Response.



Figuur 3. De Kaapverdise Eilanden en wervelstraten van Von Kármán, 23 december 2002. Het wateroppervlak in de luwte van de eilanden heeft door het ontbreken van zonneglinstering een donkerder tint. Vooral achter de meer naar het zuidwesten gelegen eilanden van de archipel, Brava, Fogo en São Tiago, toont het donkere gebied een slingerend verloop. Stroomafwaarts van Sal, Boa Vista en Maio, de meest oostelijke drie eilanden van Kaapverdië, treden wolkenpluimen op. Instrument: MODIS. Satelliet: Aqua. Bron: NASA/Visible Earth.

lusbewolking en de wolkenstraten vormen zelf overigens ook voorbeelden van door bewolking zichtbaar gemaakte luchtstromingen en wijzen op celvormige respectievelijk lijnvormige convectie in de maritieme grenslaag. De bewolking in figuren 2 en 3 toont

nog een ander effect dat kan optreden door de wisselwerking tussen luchtstromingen en eilanden. Soms vormt zich, vooral bij kleinere eilanden, een wolkenpluim achter het eiland. Dat zien we bijvoorbeeld in figuur 2 achter Porto Santo, ten noordwesten van Madeira,

dat deel uitmaakt van dezelfde eilandengroep. Vergelijkbare wolkenpluimen treden op in figuur 3 achter Sal, Boa Vista en Maio, de meest oostelijk gelegen eilanden van Kaapverdië. De strepen in de bewolking onderin de figuur ten zuiden van São Tiago duiden op zwaartekrachtsgolven.

Zand en stof

Hoewel het in de meeste gevallen de bewolking is die de aanwezigheid van wervels verraad, zijn er ook andere mogelijkheden tot visualisatie. De satellietbeelden van figuur 1 en 2 bevatten al een suggestie in welke richting we kunnen zoeken. Rechtsomder bevindt zich voor de kust van Afrika Saharazand, dat een beige waas over de Atlantische Oceaan legt. Als aflandige winden dit zand tot voorbij de Canarische of Kaapverdise Eilanden transporteren, moeten er onder geschikte omstandigheden wervels zichtbaar zijn in het zand. Belangrijk is weer de aanwezigheid van een inversie waaronder voldoende zand en stof moet zitten om stromingspatronen zichtbaar te kunnen maken.

Figuur 4 geeft een situatie waarin er inderdaad in een zuidoostelijke stroming wervels achter Canarische Eilanden konden worden waargenomen, vooral achter El Hierro in het zuidwesten en achter het noordoosten van Tenerife. De eilanden bevonden zich in een omvangrijk gebied met Saharazand. Langs de kusten van Marokko en de Westelijke Sahara zien we nog meer 'vers' zand de oceaan op waaien; ook daar fungeert het zand dus als 'tracer' voor de stromingsrichting. Verder zijn bij Tenerife lijngolven zichtbaar in het zand; zo'n wasbordpatroon achter bergen, dat duidt op golvend op en neergaande lucht-bewegingen, wordt in 'normale' gevallen zichtbaar gemaakt door (altocumulus)bewolking. De lijngolven staan loodrecht op de windstroming en geven dus weer een indicatie van de windrichting.



Figuur 4. Eilandeffecten in Saharastof boven de Canarische Eilanden, 11 februari 2001. Instrument: SeaWiFS. Satelliet: OrbView-2. Bron: NASA/GSFC SeaWiFS Project en ORBIMAGE.



Figuur 5. Saharastof boven de Atlantische Oceaan en Kaapverdië, 1 januari 2007. Er is een duidelijke wisselwerking tussen de eilanden en de stofdeken boven de Atlantische Oceaan, waarin die eilanden zich bevinden. Achter Santo Antão, het grote eiland in het noordwesten, zijn Von Kármánwervels zichtbaar. Verder treden er bij verscheidene eilanden boeggolven en Kelvin-scheepsgolven op. Instrument: MODIS. Satelliet: Terra. Bron: NASA/GSFC, MODIS Rapid Response.

Een duidelijke wervelstraat van Von Kármán, zichtbaar gemaakt door zand en stof in een luchtstroming, is te zien in figuur 5 achter Santo Antão in het uiterste noordwesten van Kaapverdië. Stof dat eerder terecht kwam op Sal en Boa Vista in het noordoosten van het land, wordt door de oostelijke luchtstroming opnieuw opgepikt en geeft weer een duidelijke indicatie van de windrichting. Achter Fogo in het zuidwesten zien we een ‘opklaringsgebied’; in dit geval zit er echter niet minder bewolking, maar minder zand. Wisselwerking tussen de oostelijke stroming en de eilanden leidt in een aantal gevallen tot de vorming van boeggolven en van Kelvin-scheepsgolven.

Zonneglinstering

Een derde manier om uit satellietbeelden conclusies te trekken over de aanwezigheid van wervels achter eilanden, maakt gebruik van zonneglinstering. Weerspiegelingen van zonlicht op zeewater leiden op die beelden door de aanwezigheid van golven veelal tot een brede, zilverwitte band. De lichtsterkte van delen van die band, hangt af van de ter plaatse optredende golfhellingen. Als de golven op de ene positie anders zijn dan op de andere, bijvoorbeeld door verschillen in windsnelheid, treden er tintverschillen op in de strook met zonneglinstering. Dat is vaak goed te zien bij eilanden in de oceaan. Aan de lijzijde van zo’n eiland is de zee namelijk meestal rustiger

dan elders; de tint van het zeeoppervlak is er daardoor soms lichter (figuur 2), soms donkerder (figuur 3), maar in ieder geval afwijkend van wat we elders zien. Onder normale omstandigheden, dat wil zeggen bij een gelijkmatige wind uit een vaste richting, hangt het gebied met rustiger water als een rechthoekige of driehoekige vaan achter de eilanden (niet afgebeeld). Treden er wervels op, dan krijgt de oplichtende zone een slingerend verloop; de wervels zitten dus niet alleen in de bewolking vlak onder de grenslaag, maar strekken zich naar beneden uit tot zeeniveau. Het verschijnsel is te zien in lichte tinten op figuur 2 achter Madeira (bovenin) en de drie Canarische Eilanden ten westen van Tenerife: La Palma, het eerder genoemde El Hierro en La Gomera. In donkere tinten treedt het verschijnsel eveneens op in de situatie van figuur 3, vooral achter Brava, Fogo en São Tiago, in het zuidwesten van Kaapverdië.

Rookpluim

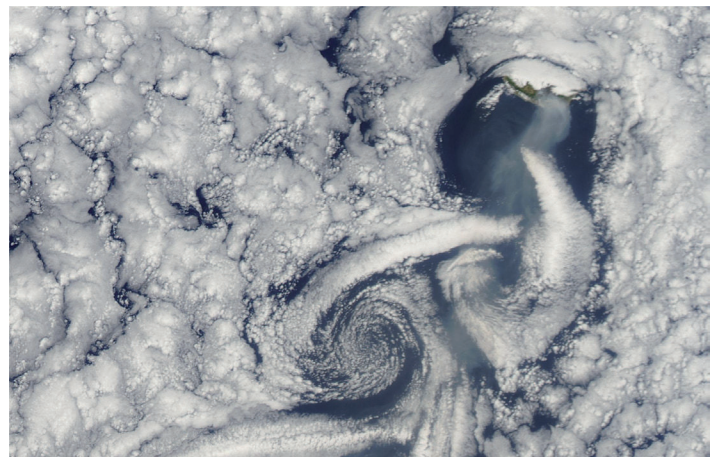
Luchtstromingen kunnen ook zichtbaar gemaakt worden met rook. Als gedachte-

experiment zouden we op Madeira of een ander eiland rookgeneratoren kunnen plaatsen om vervolgens te kijken wat er gebeurt. In situaties waarin zich Von Kármán-wervelstraten kunnen vormen, verwachten we dan geen strakke pluim, maar eerder een tussen de wervels door slingerende rookpluim.

Totaal onverwacht bleek het experiment deze zomer al in uitvoering. In augustus 2010 ontstonden er op Madeira namelijk branden in de bossen met zeer brandbare exotische eucalyptusbomen, dennen en acacia’s. Door de harde wind sloeg het vuur ook over naar de bossen met minder brandgevoelige inheemse boomsoorten die net de afgelopen tien jaar nieuw waren aangeplant. Een en ander ging vergezeld van veel rook, wat ook op satellietbeelden te zien was. In figuur 6 ligt Madeira rechtsboven; de figuur is een vergroting van een uitsnede van figuur 1. De slingerende rookpluim is duidelijk anders dan de strakke pluimen die we zagen op de satellietbeelden van bosbranden in Rusland, Brazilië en Canada, die in dezelfde periode woedden.

Conclusies

Om luchtstromingen zichtbaar te doen zijn op satellietbeelden, zijn ‘tracers’ nodig. Meestal vervult bewolking de rol van tracer, maar in incidentele gevallen kunnen ook woestijnzand of rook die rol op zich nemen. Daarnaast geeft de manier waarop het oceanoppervlak zonlicht weerspiegelt, soms een indicatie van heersende stromingspatronen. Lijwervels achter vulkanische eilanden in de oceaan zijn op alle vier de manieren soms te zien.



Figuur 6. Wervels van Von Kármán achter Madeira. Natuurbranden genereren een slingerende rookpluim. Uitsnede van figuur 1.