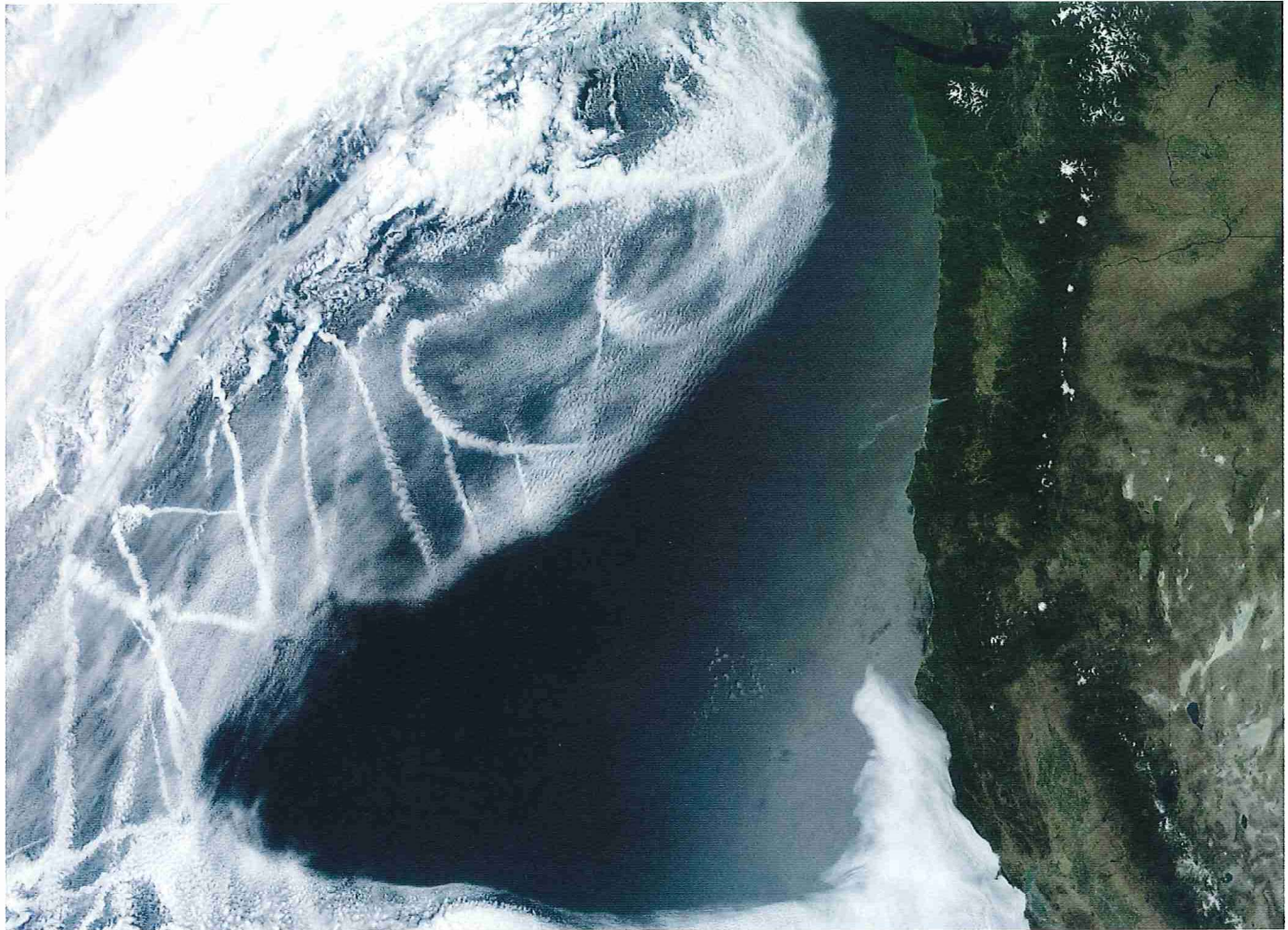


METEOROLOGICA



SCHEEPSWOLKEN (ZIE BLZ. 11)



LUCHTVERONTREINIGING ONDER EEN INVERSIE (ZIE BLZ. 4)



MISTBANKEN BOVEN EEN ENERGIECENTRALE (ZIE BLZ. 4)

van radiële divergentie op enige hoogte boven een zone van radiële convergentie. Het omgekeerde patroon hangt samen met een sterke daalstroom. In de Verenigde Staten wordt bij buienlijnen vaak gekeken naar de aanwezigheid van radiële convergentie op middelbaar niveau (MARC, mid-altitude radiële convergence). Wanneer sterke MARC wordt waargenomen bij een buienlijn, mag je sterke dalende bewegingen verwachten. In de VS vormt de detectie van sterke MARC bij een buienlijn vaak aanleiding om te waarschuwen voor zware windstoten. In het geval van onze doorsnede is vooral de updraft erg duidelijk terug te zien als een gebied met divergente boven convergentie. Van een sterke downdraft was zichtbaar op dat moment in het vlak van de doorsnede geen sprake.

CONCLUSIES

Op 28 januari 2003 kwam een felle buienlijn voor, die in veel opzichten aan het in de literatuur beschreven model van een buienlijn voldeed. Echter, deze buienlijn deed zich voor bij zeer weinig latente onstabiliiteit (lage CAPE) en was erg ondiep, wat te maken had met de polaire luchtsoort waarin de bui was ingebed. Het systeem vertoonde aanvankelijk kenmerken van een "line-echo wave pattern" (LEWP). In de omgeving van de boogvormige segmenten deden zich zware windstoten voor. Dit kan iets zijn om op te letten in de operationele praktijk. Het geval dat hier werd besproken is een illustratie van het feit dat onweer met zware windstoten niet alleen is voorbehouden aan het zomerhalfjaar.

De Doppler-radar biedt mogelijkheden om de dynamica van een buienlijn te onderzoeken. De gegevens van radiële

snelheid bieden inzicht in de stromingen rond een buienlijn en kunnen -eventueel door het ontwikkelen van producten die op de ruwe data gebaseerd zijn- gebruikt worden bij het waarschuwen voor zware windstoten veroorzaakt door buienlijnen. Iwan Holleman, die zich op het KNMI onder meer met de Doppler-radar bezighoudt, zal de komende tijd werken aan de ontwikkeling van waarschuwingsproducten gebaseerd op de radargegevens.

Literatuur

- Groenemeijer, P. H., 2003: Analysis of Three Events of Severe Deep Moist Convection in The Netherlands, KNMI rapport (verschijnt spoedig).
- Groenland, R., 2001: De Boog-echo van 7 juni 1997, *Meteorologica* 10, nr. 4, 18-22.
- Wakimoto, R.M., 2001: Convectively Driven High Wind Events, in *Severe Convective Storms*, Doswell, C. A. III (ed.), Monograph of the Amer. Met. Soc., vol. 28, #50.
- Weisman, M. L. and C. A. Davis, 1998: Mechanisms for the Generation of Mesoscale Vortices within Quasi-Linear Convective Systems, *J. Atm. Sci.*, 55, 2603-2623.

Wolken sporen van schepen en vliegtuigen

KEES FLOOR (KNMI)

Schepen kunnen, net als vliegtuigen, een langgerekt wolken spoor achterlaten. Toch zijn er talrijke verschillen tussen scheepswolken en contrails.

LOCATIES EN HOOGTE

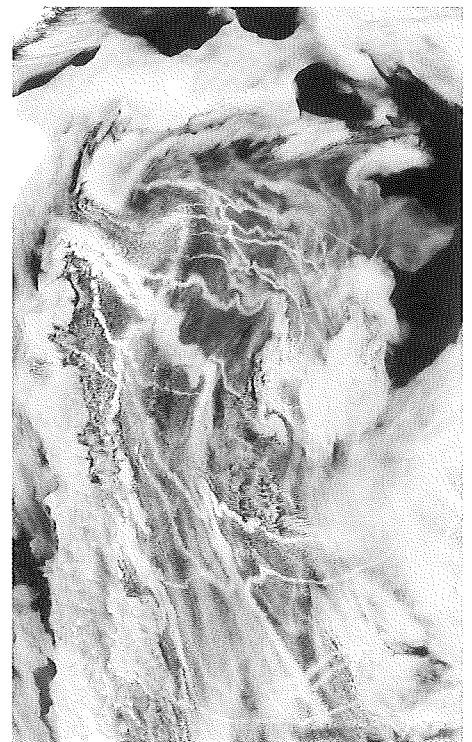
De wolken sporen doen zich voor in de gebieden waar het vliegverkeer of de scheepvaart plaats vindt. Voor vliegtuigen is dat overal ter wereld. Wel dienen de omstandigheden ter plaatse geschikt zijn voor de vorming van contrails. Er is een luchttemperatuur vereist van min 40 °C of lager. Bovendien moet de lucht wél verzadigd zijn ten opzichte van ijs, maar niet ten opzichte van vloeibaar water, want dan ontstaat er al bewolking zonder de doorkomst van vliegtuigen. Op de hoogte van 8 tot 12 km waar het internationale luchtverkeer plaatsvindt, is naar schatting in 10 tot 20 % van de tijd voldaan aan de voorwaarden voor de vorming van vliegtuigwolken (Minnis, 2003). Scheepswolken komen uitsluitend voor boven de oceanen en - in incidentele gevallen - boven zeeën. Het gebied waar ze optreden staat steeds onder invloed van

een hogedrukgebied. De wolken sporen van schepen drijven aan de bovenzijde van de zogeheten maritieme grenslaag, zeg op 1 à 2 km hoogte; dat is dus aanzienlijk lager dan de 'flightlevels' waar de vliegtuigwolken zich vormen.

De verschillen in hoogte boven het aardoppervlak, en daardoor in temperatuur, werken ook door in de fase van het water in de wolk. Vliegtuigsporen bevatten hoofdzakelijk ijs, scheepswolken bestaan uit vloeibaar water.

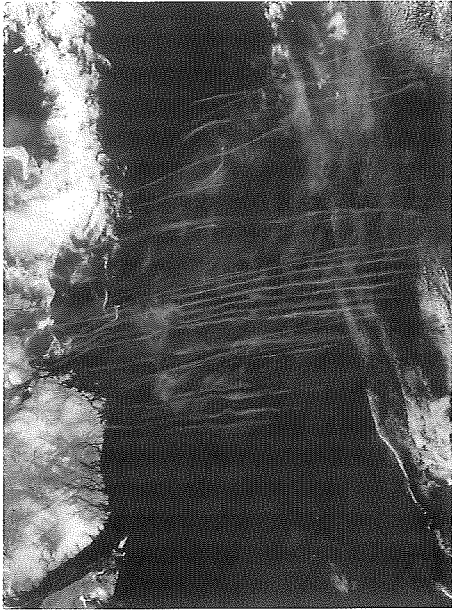
WOLKEN SPOREN OP SATELLIETBEELDEN

De wolken sporen van schepen (figuur 1) en van vliegtuigen (figuur 2) manifesteren zich op satellietbeelden meestal als dunne, rechte lijnen. Scheepswolken vertonen soms enige kromming, samenhangend met wijzigingen in de koers van het schip of veranderingen in het windveld waar het schip doorheen vaart. Op de hogeresolutiebeelden van scheepswolken, zoals bijvoorbeeld de MODIS-instrumenten op de Amerikaanse satellieten Terra en Aqua die leveren, zijn de lijnen dikker. Die beelden laten bovendien zien dat het bepaald geen strakgetrokken lijnen zijn; de sporen blij-



Figuur 1. Scheepswolken boven de Stille Oceaan, 29 april 2002. Opname van de moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) op Amerikaanse satelliet Terra van het Earth Observing System (EOS) van de ruimtevaartorganisatie NASA.

ken soms te zigzaggen en zijn even grillig als het windveld waarin ze voorkomen. De wolkenpluimen achter schepen blijven enkele uren tot enkele dagen in tact. Vliegtuigwolken variëren sterk in levensduur. Soms gaat het om een korte streep achter een vliegtuig, die snel weer is verdwenen, dan weer zijn de contrails hon-



Figuur 2. Vliegtuigwolken uit de kust van New Foundland, 28 mei 2001. Opname van dezelfde satelliet als genoemd bij figuur 1.

derden kilometers lang en blijven ze uren hangen. Op satellietbeelden zien we natuurlijk vrijwel uitsluitend de persistente contrails, die dan bovendien zo verwaaid zijn dat ze door de satellietensensor kunnen worden opgemerkt. De meeste vliegtuigen blijken zich rechtlijnig te verplaatsen, wat aanleiding geeft tot strakke wolkenstrepen. Af en toe worden ook spiraalvormige contrails waargenomen van vliegtuigen 'in de holding' (zie kader). Scheepswolken zijn vooral goed zichtbaar op VIS-beelden; de wolke druppels waaruit ze bestaan reflecteren het zonlicht effectief. Op infraroodbeelden zijn ze minder duidelijk aanwezig; daarvoor is het temperatuurcontrast tussen het oceaanwater en de lucht aan de bovenzijde van de maritieme grenslaag gewoonlijk te klein.

Vliegtuigwolken vinden we het makkelijkst terug op infraroodbeelden. Door hun lage temperatuur steken ze duidelijk af tegen het veel warmere aardoppervlak. Contrails boven bewolking onderscheiden zich minder duidelijk. Op VIS-beelden blijken de vliegtuigwolken ijl en transparant. Evenals een waarnemer vanaf het aardoppervlak door verwaaiende vliegtuigwolken heen de blauwe hemel kan zien, is van boven af het aardoppervlak zichtbaar door uitwaaiende contrails. Daardoor zijn de contrasten tussen vliegtuigwolk en ondergrond gewoonlijk minder groot dan op infraroodbeelden. Als de vliegtuigwolken zich boven andere bewolking bevinden, zijn ze daarvan vrijwel niet te onderscheiden, tenzij ze hun schaduw werpen op de lagergelegen bewolking (Floor 1997).

WERKZAME STOF

De lucht waarin de vliegtuigwolken zich vormen bevat voldoende condensatiekernen om bij een eventueel optredende oververzadiging druppelvorming mogelijk te maken. Aan de extra condensatiekernen die ingebracht worden door de verbrandingsproducten van de vliegtuigmotoren, is dus geen behoefte. Ook de aan- of afwezigheid van vrieskernen speelt geen rol; bij de temperaturen waarbij vliegtuigwolken optreden, bevriezen wolke druppeltjes van vloeibaar water vrijwel direct. Vocht is echter in de kraamkamer van vliegtuigsporen wél schaars. Bij het ontstaansproces van contrails gaat het dus vooral om het extra water.

In de maritieme grenslaag daarentegen is gewoonlijk voldoende vocht aanwezig. Onder de omstandigheden waarbij scheepswolken zich vormen, is de lucht relatief zuiver; daardoor heerst er tot op zekere hoogte een 'tekort' aan condensatiekernen. De verbrandingsproducten van de scheepsmotoren vullen dit 'tekort' aan; ze bevatten zwaveldioxide, dat hygroscopische sulfaatdeeltjes kan vormen. In de rookpluim is het aantal deeltjes dat de druppelvorming in gang kan zetten, veel groter dan daarbuiten. Het reeds in de lucht aanwezige vocht verdeelt zich in de rookpluim van schepen dan ook over veel meer condensatiekernen. Wolken met veel kleine druppeltjes reflecteren opvallend zonlicht sterker dan andere wolken met evenveel water erin, maar verdeeld over een kleiner aantal grotere druppels. Op die manier worden de scheepswolken op VIS-beelden van weersatellieten duidelijk zichtbaar (figuur 1).

De voorwaarde van zuivere lucht met relatief weinig condensatiekernen verklaart waarom de scheepswolken uitsluitend voorkomen op oceanen en niet boven door land omsloten zeeën als de Oostzee en de Middellandse Zee. De lucht boven deze en vergelijkbare zeeën heeft boven land al zoveel condensatiekernen opgepikt, dat aan het 'reinheidsgebot' niet langer is voldaan. De Noordzee neemt een uitzonderingspositie in; hij is omsloten door land, behalve bij een stroming uit noord tot noordwest. Bij een dergelijke stroming zijn ook hier scheepswolken mogelijk; een voorbeeld geeft Floor (1988, 2003).

NOG GEEN TACHTIG JAAR OUD

Vliegtuigwolken werden voor het eerst waargenomen in de Eerste Wereldoorlog; ze konden zich in die tijd vormen doordat toen de vereiste vlieghoogte bereikt kon worden (Schumann, 1996). Sinds de jaren

zestig van de vorige eeuw vormen contrails een geregelde verschijning aan de hemel.

Scheepswolken werden pas geregeld beschreven na de komst van weersatellieten; daarvoor waren er slechts incidentele rapporten van zeevarenden die niet verder teruggingen dan tot begin jaren vijftig (Lawrence, 1963). Terwijl de vliegtuigwolken al hoog en breed een dagelijkse verschijning waren geworden, kwamen de beschrijvingen van wolkenstrepen van schepen langzaam op gang. Het bewolkingspatroon werd gesignaleerd op de beelden van weersatellieten. Eerst sprak men nog van 'abnormale wolkenlijnen' (*anomalous cloud lines*) (Conover, 1966; Fett, 1979); het ongewone aan deze bewolking was dat ze zicht niets leek aan te trekken van de heersende luchtstroming. Sinds het aannemelijk werd dat deze wolkenlijnen veroorzaakt worden door schepen, wordt meestal de term 'scheepswolken' (*ship trails*) gebruikt. De oriëntatie van de bewolking volgt uit de combinatie van richting en snelheid van de wind enerzijds en van het varende schip anderzijds.

DRIJVEREN VOOR ONDERZOEK

Het onderzoek naar vliegtuigwolken en scheepswolken werd in de begintijd uitgevoerd of gretig gesponsord door militaire instellingen en instituten. De luchtmacht had last van de contrails, omdat die de aanwezigheid van vliegtuigen op geheime missies konden verraden. Voor de marine was het aanvankelijk onverwacht dat de manoeuvres van schepen die zich op de oceaan onder een stratocumulusdek probeerden schuil te houden, vanuit de ruimte konden worden gevolgd. In beide gevallen was het van belang meer te weten te komen over de omstandigheden waaronder deze 'verklikkers' optraden en om te komen tot verwachtingen voor de verschijnselen.

Tegenwoordig bekommert men zich meer om de klimaat effecten van het verkeer in de lucht en over zee. Het zwaveldioxide van de verbrandingsmotoren van de schepen heeft invloed op bewolking, neerslaghoeveelheden en stralingshuishouding. Natuurlijk zijn de schepen niet de enige bron van SO_2 , maar doordat het verschijnsel zich afspeelt ver van andere verontreinigingsbronnen, is onderzoek naar de individuele bijdrage van SO_2 mogelijk. Ook de bewolking van vliegtuigen beïnvloedt de stralingshuishouding. Daarnaast onderzoekt men de rol van de bestanddelen van de verbrandingsproducten die de vliegtuigmotoren in de atmosfeer bren-

gen. De verontreinigingen doen zich overigens altijd voor, dus niet alleen als de wolken sporen van vliegtuigen of schepen zichtbaar zijn.

CONCLUSIE

Schepen kunnen net als vliegtuigen wolken sporen achterlaten. Doordat ze daarmee hun aanwezigheid verraden, genoten de verschijnselen aandacht uit de militaire hoek. Thans zijn vooral klimaatonderzoekers er actief mee bezig. Naast deze overeenkomsten zijn er ook verschillen. Contrails zijn langer bekend, komen over-

al op aarde voor en zitten veel hoger dan scheepswolken; ze worden gevoed door het water uit de verbrandingsproducten van de vliegtuigmotoren. De pluimen achter schepen vormen zich alleen boven de oceaan 'dankzij' het uitgestoten zwaveldioxide. Vliegtuigwolken laten hun sporen vooral na op IR-beelden van weersatellieten; wolken sporen van schepen zijn beter te zien op VIS-beelden.

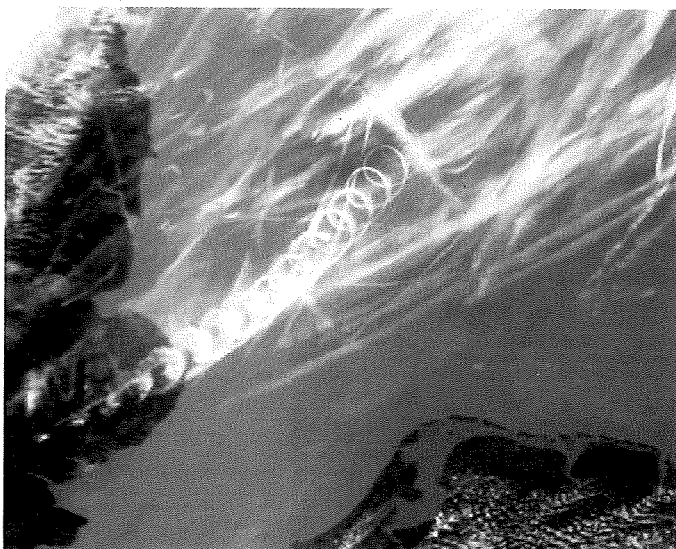
Literatuur

- Conover, J.H., 1966, Anomalous Cloud Lines, JAS 23, 778-785.
Fett, R.W. (ed.), 1979, Navy Tactical Applications Guide, Vol. 2, Environmental phenomena and effects, Park Ridge, Illinois, W.A. Bohran Company.

- Floor, C., 1988, Produktieplatforms Noordzee ontdekt op satellietfoto's; Zenit juli/augustus 1988.
Floor, K., 1997, Ongebruikelijke tintencombinatie op set satellietfoto's: wit op IR, donker op VIS; Meteorologica 6 (2).
Floor, K., 2003, Openluchtlaboratorium voor wolkenfysici, Zenit, juni 2003.
Kästner, M., 2002, Analysis of the optical depth evolution in a spiral contrail using AVHRR data, Proceedings The 2002 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Dublin, Ireland, 02-06 September 2002.
Lawrence, E.N., 1963, Artificial Cloud Formation over Sea, Marine Observer 33, 33-37.
Minnis, P., 2003, Contrails; in: Holton, J.R., Curry, J.A. & Pyle, J.A., Encyclopedia of Atmospheric Sciences, Vol. 2, 509-520 Amsterdam, Academic Press.
Schumann, U., 1996, On conditions for contrail formation from aircraft exhausts, Meteorol. Zeitschrift, N.F. 5 (1), 4-23.

SPIRAALVORMIGE SPOREN VAN VLIEGTUIGEN

Geregeld zijn, zowel vanaf de grond als op satellietbeelden, condensatiesporen te zien van vliegtuigen. Gewoonlijk volgen de toestellen een strakke koers; de vliegtuigwolken vormen dan ook meestal dunne, rechte lijnen. De oriëntatie van die lijnen hangt af van de gevolgde route, de kruissnelheid en de wind op vlieghoogte. Vliegtuigwolken kunnen elkaar snijden, maar verlopen ook vaak evenwijdig aan elkaar, zoals op het zichtbaarlicht-satellietbeeld van figuur 2. In principe is het denkbaar dat de vliegtuigen bij windstil weer min of meer gelijktijdig vanaf New Foundland, links in beeld, de oceaan oversteken richting Europa en daarbij vanuit verschillende posities langs de Canadese kust aan die oversteek beginnen. Veel waarschijnlijker is het echter dat ze een zelfde route nemen en met een stevige dwarswind op vlieghoogte. Op het moment dat een toestel het punt passeert waar zijn voorganger kort daarvoor was, is de contrail van toestel 1 al voldoende door de wind verplaatst om markante tussenruimtes te creëren tussen opeenvolgende vliegtuigsporen.



Figuur 3. Spiraalvormig patroon boven Zuidoost-Engeland en de Noordzee veroorzaakt door vliegtuig in de holding; 15 april 1993 ca. 1354 UTC. Geheel onder zijn de Waddeneilanden nog net te zien. Opname van de Amerikaanse quasi-polaire weersatelliet NOAA 11.

De verplaatsing van delen van vliegtuigwolken door de wind speelt ook een rol bij de verklaring van de zeldzame figuren die, - afhankelijk van vluchtpatroon en wind -, af en toe op satellietbeelden kunnen worden waargenomen. Figuur 3 geeft van zo'n geval boven de Noordzee een infraroodbeeld, afkomstig van de Amerikaanse weersatelliet NOAA-11. Op de figuur zijn overigens ook 'gewone' contrails zichtbaar. Zonder wind zou je denken aan een verkenningsvlucht, waarbij voor een spiraalvormige route is gekozen om optimale dekking van het te verkennen gebied te krijgen. Brengen we de wind in rekening, dan blijkt een cirkelvormige baan van een vliegtuig al voldoende om het getoonde patroon te krijgen. Steeds als een rondje is volbracht en het vliegtuig terug is op de uitgangspositie, heeft de wind het deel van de contrail dat daar was gevormd al verplaatst.

Figuur 4 toont een zelfde spiraalvormige vliegtuigwolk, maar nu gezien vanaf de grond. De opname werd gemaakt door Arne Hansen (NAVO) en kwam ter beschikking door tussenkomst van Martina Kästner (2002) van het DLR Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, Duitsland.



Figuur 4. Spiraalvormig patroon veroorzaakt door vliegtuig in de holding. Met dank aan Arne Hansen (NAVO).