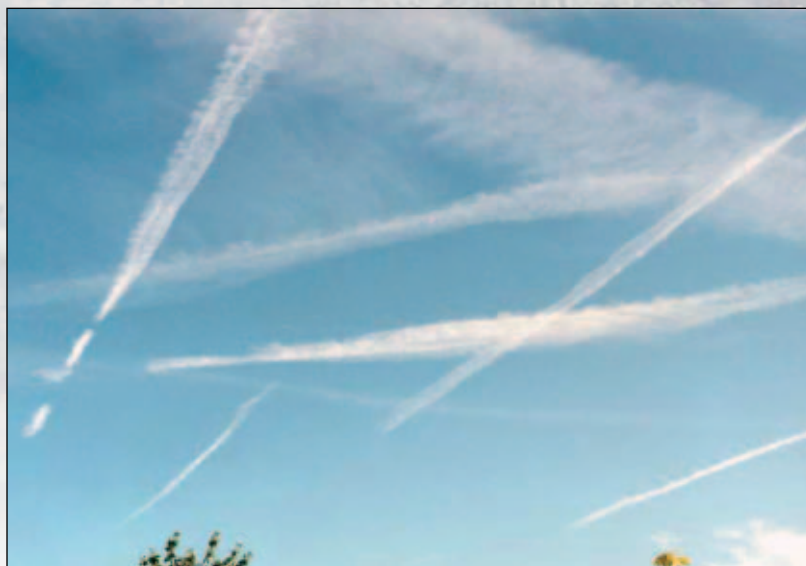


Vliegtuigwolken

1. Vliegtuigwolken of contrails tegen een vrijwel onbewolkte hemel. De oudste contrail (rechtsboven) is het breedst en het meest verwaaid. (Foto: Malcolm Walker)



‘In onze tijd van druk vliegverkeer is de vorming van vliegtuigwolken een verschijnsel dat ons allen vertrouwd is geworden’, zo schreef Minnaert in 1970 in het tweede deel van *De Natuurkunde van ‘t vrije veld*. Uit zijn beschrijving van het verschijnsel kun je opmaken dat hij met veel plezier de vorm en het gedrag van deze kunstmatig opgewekte bewolking heeft bestudeerd. Inmiddels is het vliegverkeer drastisch toegenomen. De vertrouwdheid met vliegtuigwolken is er nog steeds maar het enthousiasme is tanende. In de kommertijd tijdens de zomervakantie bevatten de opiniepagina’s van de dagbladen geregeld inzendingen van lezers die door het verschijnsel een zonnige dag aan hun neus voorbij zien gaan. Ook wie de sterrenhemel wil waarnemen is niet blij met de extra bewolking die de vliegtuigen veroorzaken. Daarnaast zijn de contrails, zoals de vliegtuigwolken ook wel genoemd worden, in een kwaad daglicht komen te staan door hun mogelijke rol bij klimaatveranderingen.

2. Vliegtuigwolken kort voor zonsondergang, 16 maart 2003. Tevens is een lichtzuil zichtbaar boven de zon, een van de haloverschijnselen. (Foto: Jasper Schweppe)



Vliegtuigwolken hangen op vlieghoogte, zo’n acht tot twaalf kilometer hoog (fig. 1 en 2). Ze ontstaan in delen van de dampkring waar het min veertig graden is of kouder. De vliegtuigwolken bestaan dan ook hoofdzakelijk uit ijskristallen. De hiervoor vereiste vlieghoogte werd voor de eerste maal bereikt in de Eerste Wereldoorlog; de oudste waarnemingen van vliegtuigwolken dateren van 1915. Sinds de jaren zestig, na de komst van verkeersvliegtuigen met straalmotoren, zijn ze een frequente verschijning aan de hemel geworden. Vanaf dat moment is het vliegverkeer per jaar met gemiddeld negen procent toegenomen.

Vliegtuigwolken beginnen op een afstand van tien tot dertig meter achter de motoren van het toestel (fig. 3) en kunnen onder daarvoor gunstige omstandigheden tientallen tot honderden kilometers lang worden. Daardoor zijn ze soms ook urenlang zichtbaar.

Satellietbeelden

De condensatiesporen van vliegtuigen zijn op satellietbeelden geregeld waar te nemen. Meestal gaat

het om rechtlijnige, dunne strepen (fig. 4). Het duidelijkst zichtbaar zijn ze op infraroodbeelden (niet afgebeeld). Op deze beelden heeft bewolking bij de gebruikelijke zwartwitweergave een tint die lichter is naarmate de temperatuur lager is. Vliegtuigwolken zijn betrekkelijk koud; de temperatuur bedraagt zoals we zagen hooguit min veertig graden. De vliegtuigen trekken daardoor op infraroodbeelden dunne witte strepen, die zich duidelijk aftekenen tegen de donkerder grijs tinten van het aardoppervlak en de lager gelegen bewolking.

Onder bepaalde omstandigheden zijn vliegtuigwolken eveneens zichtbaar op satellietopnamen in zichtbaar licht; daarbij is wel een hoge resolutie en een contrasterende ondergrond vereist. Net zoals een waarnemer vanaf het aardoppervlak door verwaaiende vliegtuigwolken heen de blauwe hemel kan zien, is van boven af het aardoppervlak door de uitwaaiende contrails heen zichtbaar. Daardoor zijn de contrasten tussen vliegtuigwolk en ondergrond gewoonlijk minder groot dan op infraroodbeelden. Als de vliegtuigwolken zich boven andere wolken bevinden,

3. Vliegtuigwolken beginnen op een afstand van 10-30 m achter de motoren van het toestel. (Foto: Josef P. Willems/Airliners.net)

zijn ze niet of nauwelijks te zien, tenzij ze een schaduw op die onderliggende bewolking werpen. Naast de gewone, rechtlijnige vliegtuigwolken worden in uitzonderlijke gevallen – afhankelijk van vluchtpatroon en wind – ook spiraalvormen waargenomen. Figuur 5 geeft een voorbeeld. Zo’n patroon ontstaat als het vliegtuig ‘in de holding’ hangt en rondjes vliegt. Zonder wind zou een cirkelvormige contrail te zien zijn, met wind ontstaat een spiraal. In het geval van figuur 5 stond er op de vlieghoogte van ongeveer negen kilometer een noordelijke wind van 110 km/uur.

Ontstaan

Vliegtuigwolken bestaan grotendeels uit ijs. Dat blijkt zowel uit metingen ter plekke als uit het optreden van bijzonnen en andere haloverschijnselen in de contrails; van haloverschijnselen is namelijk bekend dat ze zich uitsluitend in ijskristallen voordoen. Toch vormen zich in de waterdamp die bij de

Kees Floor*

* Kees Floor is hoofd van de afdeling Meteorologische Opleidingen van het KNMI in De Bilt.



4. Vliegtuigwolken boven het Rhônevallei in Frankrijk, ten westen van Lyon. De opname werd gemaakt op 15 mei 2002 vanuit het internationale ruimtestation. Recent gevormde contrails zijn dunne strepen; oudere vliegtuigwolken zijn enigszins verwaaid door de wind. Rechtsboven het Meer van Genève.

verbranding in de motoren vrijkomt eerst waterdruppeltjes. Dat komt doordat ijskristallen alleen *direct* uit waterdamp kunnen ontstaan met behulp van zogeheten sublimatiekernen en die zijn vrij zeldzaam. Ook bij de vorming van wolken druppeltjes zijn kernen nodig, maar deze condensatiekernen zijn meestal overvloedig aanwezig: zelfs buiten de uitlaatgassen van vliegtui-

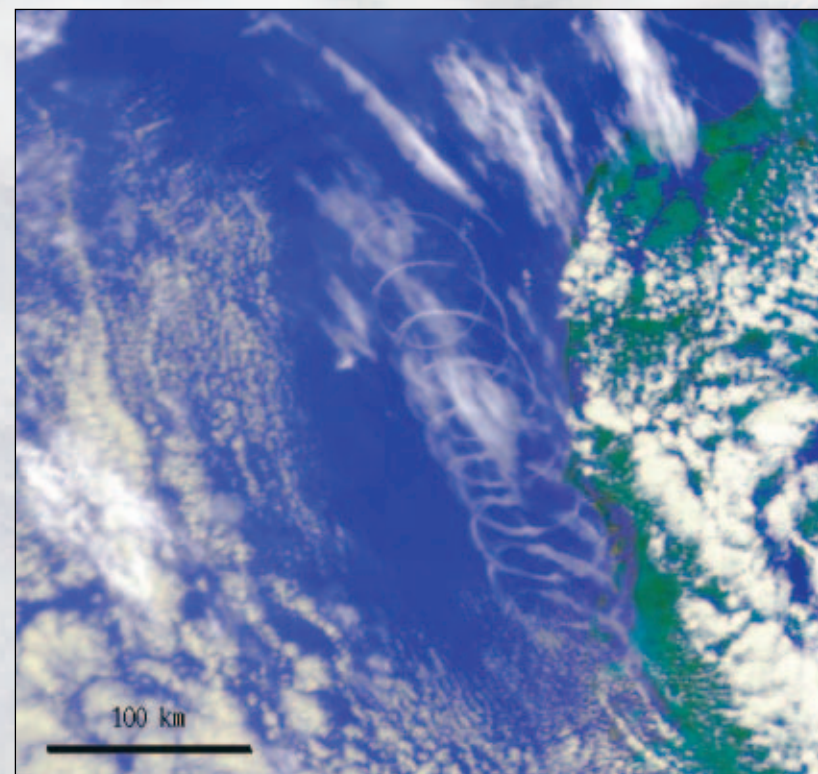
gen bevat lucht gewoonlijk al zo'n honderd condensatiekernen per kubieke centimeter die geschikt zijn om druppelvorming op gang te brengen. De waterdruppeltjes bevriezen overigens snel; bij temperaturen van min veertig of lager zijn daarvoor zelfs geen vrieskernen meer nodig. Zolang er nog vloeibaar water in het condensatiespoor aanwezig is,

groeien de ijskristallen aan ten koste van de overgebleven wolken druppeltjes. Boven ijs is de dampspanning namelijk lager dan boven vloeibaar water; ijs trekt daardoor als het ware de waterdamp die de waterdruppeltjes omgeeft naar zich toe. Na verloop van tijd is er in de vliegtuigwolk geen vloeibaar water meer over.

Het verschil in dampspanning boven water en boven ijs maakt ook dat ijskristallen kunnen overleven in gebieden waar waterdruppeltjes verdampen en waar het dus, afgezien van de condensatiesporen van de vliegtuigen, onbewolkt is. Vliegtuigwolken die zich lang handhaven bevinden zich steeds in lucht die oververzadigd is voor ijs, maar nog niet verzadigd voor vloeibaar water. Als de lucht wel verzadigd zou zijn ten opzichte van vloeibaar water, zou er allang bewolking zijn. De voor de vorming van vliegtuigwolken vereiste omstandigheden komen in de atmosfeer op vlieghoogte geregeld voor: naar schatting tien tot twintig procent van de tijd. De contrails treden vooral op in een zone direct voor het gebied van de hogere bewolking van een warmtefront; daarnaast doen ze zich voor aan de zuidzijde van de straalstroom en zo nu en dan tevens in heldere lucht ver weg van depressies.

Literatuur

- Floor, K., 1997, 'Ongebruikelijke tintencombinatie op set satellietfoto's: wit op IR, donker op VIS'; *Meteorologica* **6** (2), juni 1997.
 Floor, K., 2003, 'Wolkensporen van schepen en vliegtuigen', *Meteorologica* **12** (3) september 2003.
 Ludlam, F.H., 1980, *Clouds and Storms*, 52-53.
 Minnaert, M., 1970, *De natuurkunde van 't vrije veld 2: geluid, warmte, electriciteit*; Zutphen, Thieme & Cie, 196-197
 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.



5. Spiraalvormige vliegtuigwolk boven de Duitse Bocht, 22 mei 1998, 1236 UT. Opname van de Amerikaanse weersatelliet NOAA 14. Beeldbewerking DLR Instituut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, Duitsland. (Met dank aan Martina Kästner)