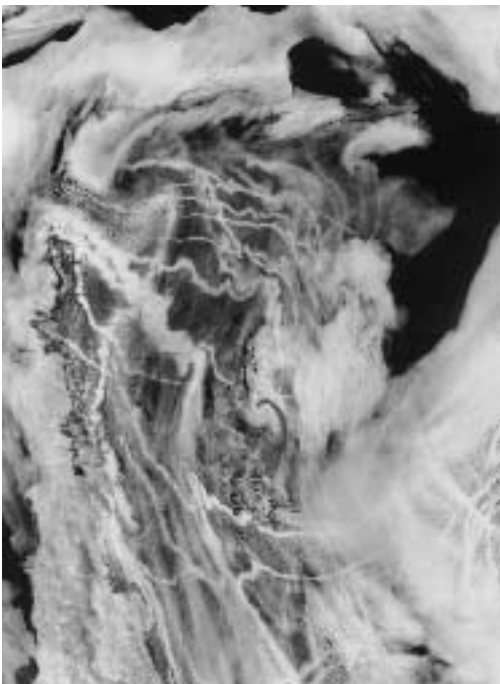


# De verklaring van scheepswolken

Openluchtlaboratorium voor wolkenfysici

**B**ij rustig weer aan de flank van hogedrukgebieden boven de oceaan laten schepen af en toe wolken sporen achter (figuur 1). De sporen zijn langwerpig, waai-eren enigszins uit, lijken soms wat te zigzaggen en hebben daardoor wel wat weg van rookpluimen. Ze lijken zich weinig aan te trekken van de heersende windrichting. De scheepswolken kunnen tot 1000 km lang worden en variëren in breedte van enkele kilometers, dicht bij het schip, tot enkele tientallen kilometers op grotere afstand. De wolkenpluimen blijven enkele uren tot enkele dagen in tact. Op satellietbeelden zijn ze geregeld te zien, waarmee zelfs schepen die zich onder bewolking proberen te verschuilen tegen spionagesatellieten, hun aanwezigheid verraden.



**Figuur 1. Scheepswolken boven de Stille Oceaan, 29 april 2002.**

Daar was de Amerikaanse marine natuurlijk niet zo blij mee; vandaar dat ze reeds in de jaren zeventig van de vorige eeuw onderzoek begon te verrichten of te financieren naar het optreden van dit verschijnsel. De weersomstandigheden waaronder scheepswolken ontstaan, konden zo verder worden vastgelegd. Naast de al genoemde nabijheid van een hogedrukgebied en de zwakke tot matige wind,

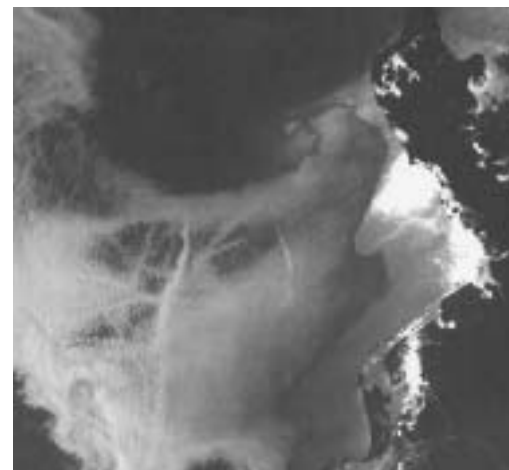
bleek een hoge luchtvochtigheid vereist van 90% of meer. Het zeewater is dan meestal net iets warmer dan de lucht erboven. Vaak is het enigszins mistig of zit er een dunne laag bewolking - in het meteorologische jargon stratus of stratocumulus - op geringe hoogte. Soms valt er uit de stratocumulus wat lichte motregen. In gevallen waarin het temperatuurverloop met de hoogte kon worden vastgesteld, bleek er een dunne, onstabiele en vochtige luchtlaag boven de oceaan aanwezig: de zogenoemde maritieme grenslaag. Aan de bovenzijde daarvan blijft de temperatuur constant of neemt ze zelfs iets toe; een zogeheten inversie. Deze inversie wordt veroorzaakt door dalende luchtbewegingen die kenmerkend zijn voor hogedrukgebieden en heet daarom ook wel subsidentie-inversie. Eventuele stratus- of stratocumulusbewolking bevindt zich net onder de inversie en datzelfde geldt voor de scheepswolken, indien die zich vormen.

## Wolkenfysica

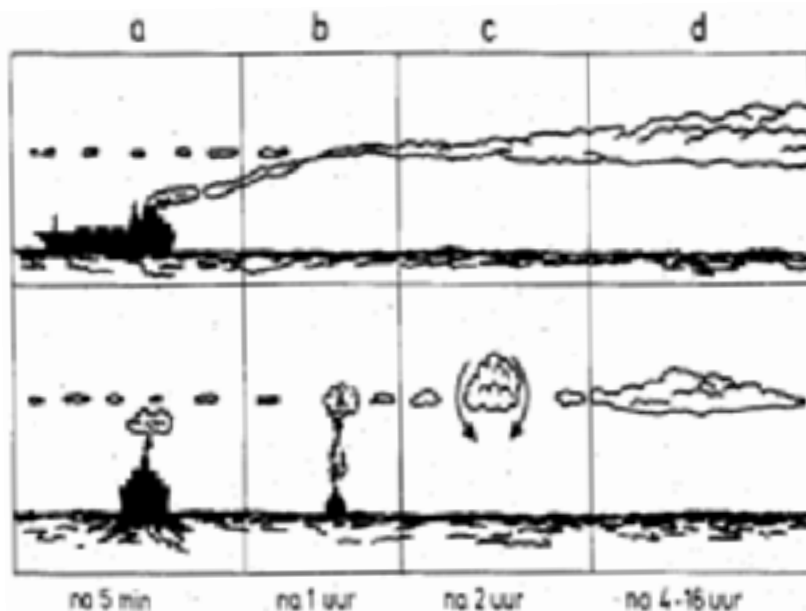
Het optreden van wolken sporen achter schepen herinnert ons eraan dat er bij een verklaring van wolkenvorming meer komt kijken dan condensatie van waterdamp in, tijdens al dan niet gedwongen opstijging, afgekoelde lucht. De waterdamp is afkomstig van het aardoppervlak; de zon levert de benodigde verdampingswarmte en klaar is kees. Als dit het hele verhaal was, zouden de schepen geen invloed hebben op details van de bewolking die bij aanwezigheid van de wolken sporen zichtbaar zijn. Dat dit in werkelijkheid wel het geval is, komt doordat in de atmosfeer het proces van wolkenvorming op gang wordt gebracht door condensatiekernen, zo leert ons de wolkenfysica. Wolkenfysica is het onderdeel van de meteorologie dat gaat over de vorming en het oplossen van bewolking. Condensatiekernen zijn microscopisch kleine, onzichtbare maar overvloedig aanwezige deeltjes in de lucht. De meeste condensatiekernen zijn van natuurlijke oorsprong; daarnaast is een deel afkomstig van menselijke activiteit, voornamelijk verbranding van fossiele brandstoffen of biomassa. Zonder condensatiekernen zou het op aarde steeds onbewolkt zijn en zou de lucht waarin we leven altijd vetig en vochtig zijn. Satellietfoto's zouden een oeverloze herhaling vormen van wat we al kennen van de Bosatlas.

De eigenschappen van de kleine deeltjes in de lucht lopen uiteen. Vooral als ze makkelijk oplossen in water, blijken ze een grote aantrekkingskracht voor waterdamp te bezitten en een sterke stimulans te vormen voor het ontstaan van wolken. Deeltjes met deze eigenschap noemt men hygroscopisch. De rook van schepen bevat zwaveldeioxide, dat hygroscopische sulfaatdeeltjes kan vormen. In de rookpluim is het aantal deeltjes dat voor druppelvorming beschikbaar is, veel groter dan daarbuiten. Dit geldt des te sterker voor de lucht waarin de scheepswolken zich gewoonlijk vormen; deze blijkt namelijk van zichzelf relatief schoon te zijn en weinig werkzame condensatiekernen te bevatten. Daarom zien we de scheepswolken ook alleen op de oceanen. Boven de Middellandse Zee of de Oostzee zijn ze nooit waargenomen, omdat de lucht er altijd over land komt aanwaaien en daardoor niet zuiver genoeg is. Boven de Noordzee doen de wolken sporen van schepen zich wel eens voor (zie figuur 2). Bij noordwestenwinden kan de zuivere oceaanlucht namelijk ook over de Noordzee uitstromen.

Het beschikbare vocht verdeelt zich in de rookpluim van schepen over veel meer condensatiekernen dan daarbuiten. 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 deze manier waren de witte pluimen op de satellietfoto's verklaard (figuur 3). Meteorologen kunnen de



**Figuur 2. Scheepswolken boven de Noordzee (NOAA/KNMI).**



**Figuur 3:**

**De vorming van scheepswolken in zijaanzicht (boven) en achteraanzicht (onder):**

**a. De verbrandingsgassen van scheepsmotoren zijn warmer dan de omringende lucht en stijgen langzaam op naar de bovenkant van de maritieme grenslaag.**

**b. De verbrandingsproducten van de scheepsmotoren bevatten onder meer zwaveldioxide, dat hygrosopische sulfaatdeeltjes kan vormen. De sulfaatdeeltjes fungeren als werkzame condensatiekernen. Het aantal druppeltjes in de wolk neemt daardoor toe en de wolk gaat meer zonlicht terugkaatsen.**

**c. Verdere uitbreiding en uitdunning van het wolken spoor naar boven toe wordt tegengegaan door de subsidentie-inversie, die als een deksel op de maritieme grenslaag ligt. Soms ontstaan aan beide zijden van het wolken spoor neerwaartse bewegingen die de eventueel aanwezige bewolking naast de scheepswolken doen verdwijnen.**

**d. Als het proces van wolkenvorming enige tijd heeft geduurd, is het schip zo ver weg dat geen nieuwe uitlaatgassen de wolk nog kunnen bereiken. Het wolken spoor dijt uit en wordt breder dan een jonger gedeelte van dezelfde scheepswolk.**

gebieden aangeven waar zich gemakkelijk scheepswolken vormen en militairen kunnen er bij hun manoeuvres rekening mee houden.

### Openluchtlaboratorium

Ook al leek het verschijnsel nu volledig verklaard, toch bleven onderzoekers geïnteresseerd in de scheepswolken. Na de militaire invalshoek van de jaren zeventig, werd in de decennia daarna het onderzoek naar klimaat en klimaatveranderingen de drijfveer. Men vermoedt dat bewolking bij die klimaatveranderingen een belangrijke rol speelt; daarom wilde men meer te weten komen over de processen die met wolkenvorming gemoeid zijn. Ook de invloed van menselijke activiteit op het gedrag van bewolking moet daarbij in kaart worden gebracht. Scheepswolken vormen in dat kader een dankbaar studieobject. Bovendien zijn de omstandigheden om dat onderzoek uit te voeren in de regio's waar de scheepswolken optreden, ideaal. Over het algemeen komt daar namelijk weinig turbulentie of convectie voor, wat erop neer komt dat de atmosfeer er rustiger is dan boven land. Daarnaast vormt de subsidentie-inversie aan de bovenzijde van de maritieme grenslaag als het ware een deksel op die laag die voorkomt

dat de te onderzoeken stoffen te sterk verdunnen. Zoals gezegd ontstaan scheepswolken uit een bron van verontreiniging in relatief schone lucht; aan die verontreiniging kan daardoor makkelijk gemeten worden. Vergelijk dit met de situatie boven land, waar zoveel uiteenlopende verontreinigingsbronnen zijn die vanuit verschillende locaties stoffen in de dampkring brengen, dat je het overzicht snel kwijt bent. Bovendien is de uitwisseling met hoger gelegen luchtlagen boven land over het algemeen veel intensiever, zodat de te meten stoffen sterker verdund raken en moeilijker meetbaar zijn. We zagen al dat de scheepswolken zich enkele uren tot enkele dagen kunnen handhaven; dat is lang genoeg om de onderzoekers, meestal wolkenfysici, rustig hun werk te laten doen. Kortom, de gebieden waarin zich wolken sporen van schepen bevinden, vormen een ideaal openluchtlaboratorium voor wolkenfysici. Zij maakten daar dan ook dankbaar gebruik van. De werkvoorbereiding vond thuis of op een instituut plaats aan de hand van satellietfoto's zoals figuur 1. Voor het eigenlijke meetwerk moest men met meetvliegtuigen naar het openluchtlab. Dat leverde onder meer de volgende onderzoeksresultaten op: in de scheepswolken bleek het

aantal waterdruppeltjes per  $\text{cm}^3$  het dubbele te zijn van wat daarbuiten werd gemeten. De diameter van de druppeltjes was 6% kleiner, veelal te klein om nog motregen te kunnen opleveren. De hoeveelheid wolkenwater per  $\text{m}^3$  bleek verdubbeld! Vooral dat laatste was totaal onverwacht; voor de verklaring van scheepswolken zoals die in de vorige paragraaf werd gegeven, was een toename van de waterinhoud namelijk niet noodzakelijk. Het reflecterende vermogen van de scheepswolken wordt door dit effect extra opgevoerd. Satellietdata lieten zien dat de scheepswolken 13% helderder zijn dan de omringende bewolking.

### Gevolgen voor klimaatverandering

De onderzoeksresultaten zijn belangrijk voor de studie van klimaatverandering. Kennelijk bevordert de uitstoot van zwaveldioxide ( $\text{SO}_2$ ), dat naast koolstofdioxide ( $\text{CO}_2$ ) vrij komt bij de verbranding van fossiele brandstoffen, de wolkenvorming. Tevens verhoogt het de reflectiviteit van bewolking en onderdrukt het de neerslag. Zonlicht dat door wolken wordt teruggekaatst, bereikt het aardoppervlak niet meer en kan ook niet worden vastgehouden door het broeikas effect. Mogelijk verklaart deze gang van zaken dat de temperatuurstijging op het zuidelijk halfrond, waar minder menselijke activiteit plaatsvindt en waar minder biomassa wordt verbrand, groter is dan op het noordelijk halfrond.

Dit betekent overigens niet dat we de opwarming van de aarde kunnen tegengaan door meer fossiele brandstoffen te gebruiken. Het  $\text{CO}_2$  verblijft jaren in de atmosfeer en verspreidt zich over de hele aardbol. De sulfaatdeeltjes vallen langzaam naar beneden of regenen uit, verblijven daardoor korter in de dampkring en steken vrijwel nooit de evenaar over. De opwarming  $\text{CO}_2$  is dus mondiaal, terwijl de tempering van de aanwarming door  $\text{SO}_2$  en daarvan afgeleide stoffen slechts regionaal plaatsvindt.

### Scheepswolken op satellietbeelden

Tot slot terug naar de satellietbeelden. Het beeld van figuur 1 toont haarscherp talrijke scheepswolken boven de Stille Oceaan. De getoonde opname werd gemaakt op 29 april 2002 en is afkomstig van de moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) op de Amerikaanse satelliet Terra van het Earth Observing System (EOS) van de ruimtevaartorganisatie NASA.

De zeldzame wolken sporen van schepen op de Noordzee in figuur 2 werden in beeld gebracht door de Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) van de Amerikaanse operationele weersatelliet NOAA 8 op 21 juni 1983.

Drs. K. Floor is medewerker van het KNMI