

Stratocumulus, een saaie wolk of spannende fysica?

De atmosfeer boven Nederland is rijk aan vele verschillende wolkensoorten. Getuige de mythologische verhalen van Thor en zijn donderhamer spreken onweerswolken misschien wel het meest tot de menselijke verbeelding. In grote tegenstelling hiermee wordt stratocumulus, een grauw ogend laaghangend wolkendek, meestal als saaie ervaren. Omdat processen zoals turbulentie, de interactie van wolkendruppeltjes met zowel zonne- als infraroodstraling en niet te vergeten klassieke thermodynamica allemaal een belangrijke rol spelen, is stratocumulus echter een uitermate spannend fysisch studieobject (figuur 2). Begrip van de fysische processen achter stratocumulus (ontstaan, oplossen, uitregenen) is onontbeerlijk voor een nauwkeurige weersverwachting. Stratocumuluswolken komen wereldwijd veel voor (figuur 3). Door de sterke terugkaatsing van invallend zonlicht is stratocumulus een belangrijke factor in het mondiale klimaat.

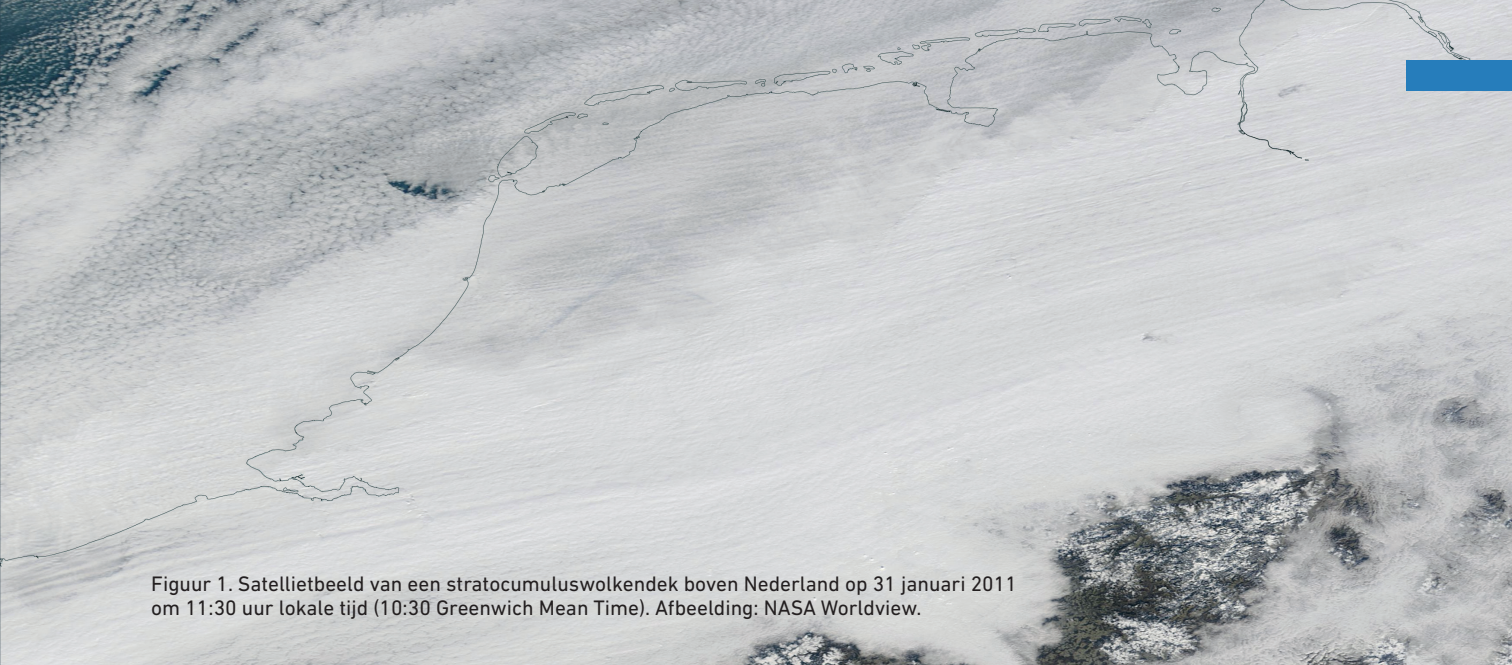
Hoe ontstaat stratocumulus?

Stratocumulus ligt vaak als een witte deken over Nederland, zoals in januari 2011 (figuur 1). Omdat aan de grond de temperatuur destijds rond het vriespunt lag, en eventuele neerslag kan leiden tot ijzelvorming, was dit wolkendek een mogelijk probleem voor het wegverkeer en de luchtvaart. Helaas werd de stratocumulus toen flink onderschat door de meeste rekenmodellen voor de weersverwachting.

De verticale structuur van de temperatuur en vochtigheid in het wolkendek van de satellietopname vertoonde bij 500 m hoogte een thermische inversie (figuur 4). Daar nam de temperatuur van de lucht met zo'n 8 °C toe en daalde de luchtvochtigheid sterk. Deze stabiele stratificatie werkt als

een schot tegen vermenging van de twee luchtlagen. Het vocht dat door verdamping vanaf het aardoppervlak in de atmosfeer terecht komt, hoopt zich op onder de inversielaag. Dit kan vervolgens leiden tot grootschalige wolkenvorming. Omdat verdamping het sterkst is boven open water ontstaat in Nederland stratocumulus het gemakkelijkst boven de Noordzee. Door de wind kan het wolkendek zich richting en over het vasteland verplaatsen ('advectie'). Overigens is het effect van een sterke thermische inversie tijdens onbewolkte omstandigheden vaak goed zichtbaar boven een stedelijke of industriële omgeving. De inversielaag markeert een strakke grens tussen relatief vervuilde lucht, gekenmerkt door een lichtbruine kleur, en schonere, heldere lucht

erboven. Dit komt omdat luchtverontreiniging zich net als waterdamp opheeft in de relatief ondiepe luchtlaag onder de thermische inversie. Het grote temperatuurverschil in de inversielaag ontstaat meestal boven een relatief koel grondoppervlak samen met een langzame neerwaartse luchtstroming van ongeveer 0,5-1 cm/s. Deze opwarming van lucht door adiabatische compressie treedt vaak op in een hogedrukgebied en heet grootschalige subsidentie. Volgens de wet van Clausius-Clapeyron kan warmere lucht meer waterdamp bevatten. Omdat waterdamp dus minder gemakkelijk condenseert bij hogere temperaturen is er meestal weinig bewolking in een hogedrukgebied. Stratocumulus is dus een belangrijke uitzondering op deze regel. Deze



Figuur 1. Satellietbeeld van een stratocumuluswolkendek boven Nederland op 31 januari 2011 om 11:30 uur lokale tijd (10:30 Greenwich Mean Time). Afbeelding: NASA Worldview.

wolkensoort kan ontstaan in relatief koele, vochtige lucht onder een warmere luchtlaag. Uitgestrekte subtropische stratocumulusgebieden (figuur 3) worden verklaard door hogedrukgebieden boven relatief koel oceanwater.

Het effect van infraroodstraling op turbulentie in wolken

Op- en neerwaartse fluxen van warmtestraling kunnen met vliegtuigen gemeten worden (figuur 5). De thermische warmtestraling loodrecht vanaf een vlakke plaat met temperatuur T wordt volgens de wet van Stefan-Boltzmann gegeven door

$$F = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

met $\varepsilon = 1$ de emissiviteit van een perfecte straler en $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$. Voor temperaturen die kenmerkend zijn voor de aarde valt de thermische straling in het infrarood. Het aardoppervlak, maar ook een wolkendek dat dik genoeg is, is in goede benadering een perfecte straler. Omdat een heldere atmosfeer een lagere emissiviteit heeft leidt dit net onder de wolken top tot een opvallende sprong van wel 70 W/m^2 in de neergaande infrarood stralingsflux. Een laaghangende wolk zorgt dus voor een sterke toename in de inkomende hoeveelheid infraroodstraling bij het aardoppervlak. Daardoor is de afkoeling bij heldere nachten veel sterker dan bij laaghangende bewolking. Door de infraroodstraling die extra bij de grond aankomt verliest het wolkendek energie en koelt de wolken top af. Een

verandering van de netto-stralingsflux F_{rad} leidt volgens de wet van behoud van energie namelijk tot de volgende verandering van de temperatuur

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial F_{\text{rad}} \uparrow - F_{\text{rad}} \downarrow}{\partial z}, \quad (2)$$

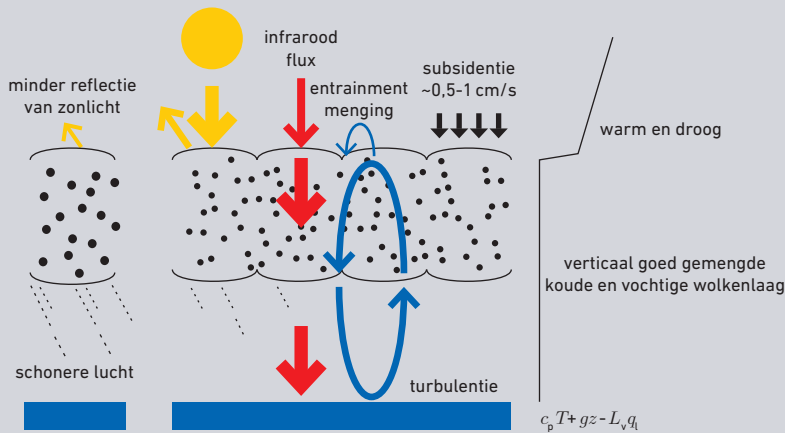
met t de tijd, ρ de dichtheid van lucht, c_p de warmtecapaciteit van lucht bij constante druk en de pijlen geven de richting van de stralingsfluxen aan. De sterke toename in de netto-infraroodstraling met de hoogte geeft dus een sterke afkoeling van de wolken top van enkele graden per uur. Door afkoeling neemt de dichtheid van de lucht geleidelijk toe zodat een dalende stroming zal ontstaan. Omdat water verdampt in de neergaande wolkenlucht, en omgekeerd in opwaartse stromingen condenseert en warmte produceert, wordt de turbulentie aangewakkerd. Deze turbulentie mengt de onderste luchtlaag flink door elkaar. Als bijvangst wordt er ook een beetje warme en droge lucht van net boven de inversielaag de wolkenlaag in gemengd. Dit proces wordt *entrainment* genoemd en vormt misschien wel de grootste uitdaging om accuraat te bepalen in een model voor de weersverwachting. Immers, hoe meer warme en droge lucht er van bovenaf wordt bijgemengd, des te dunner wordt de wolk.

Wolkendruppeltjes en de weerkaatsing van zonnestraling

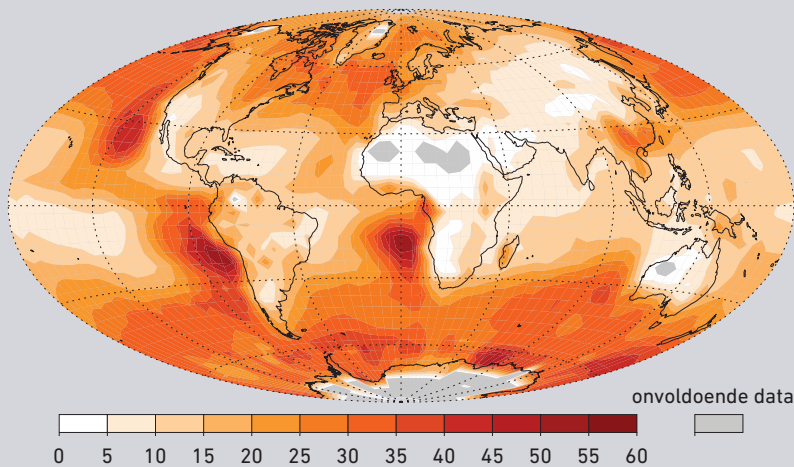
Het somber ogende karakter van strato-



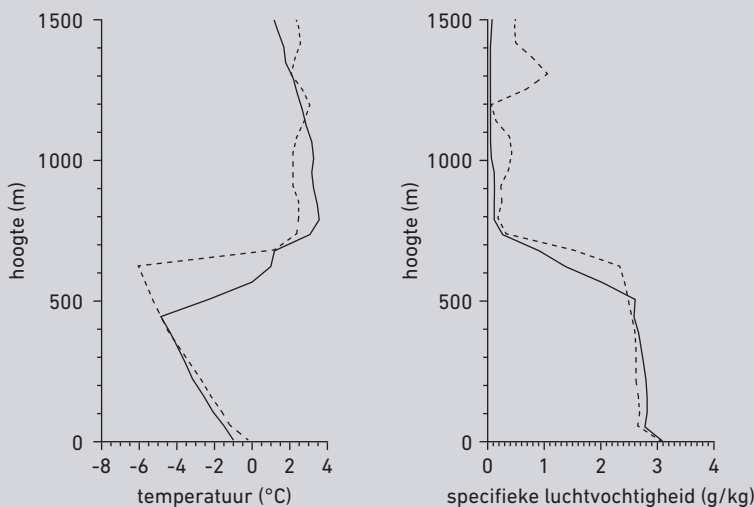
Stephan de Roode studeerde (1994) en promoveerde (1999) bij het IMAU (UU). Na een aantal postdocposities bij onder andere de University of Washington en het KNMI is hij sinds 2008 als universitair docent verbonden aan de TU Delft. Hij is een van de hoofdontwikkelaars van het Dutch Atmospheric Large-Eddy Simulation-model (DALES). Met behulp van metingen en DALES bestudeert hoe wolken, wind en de verspreiding van stedelijke luchtverontreiniging worden beïnvloed door turbulentie. S.R.deRoode@tudelft.nl



Figuur 2. Schematische weergave van de relevante fysische processen in stratocumulusbewolking. Door de turbulentie is de *liquid static energy* (zie kader *Adiabatische temperatuurprofielen*) bij benadering constant tot aan de wolkenkop.



Figuur 3. Jaargemiddelde fractie van de tijd met stratocumuluswolken. Afbeelding: © American Meteorological Society [1]. Geplaatst met toestemming.



Figuur 4. Verticale profielen van de temperatuur en luchtvochtigheid gemeten met weerballonnen opgelaten op 31 januari 2011 vanaf het KNMI in De Bilt. De doorgetrokken en gestreepte lijnen staan respectievelijk voor de metingen om 0 en 12 Greenwich Mean Time (01:00 en 13:00 uur lokale tijd).

cumulus komt door de sterke reflectie van het invallende zonlicht door de wolke druppeltjes. De reflectie wordt bepaald door de optische dikte τ van de wolk,

$$\tau = \int \int Q_{\text{ext}} \pi n(r, z) r^2 dr dz, \quad (3)$$

met n de concentratie van wolke druppeltjes met straal r op hoogte z en $Q_{\text{ext}} \sim 2$ de extinctiefactor. Er zit een belangrijke subtiliteit in de definitie van τ . We zien namelijk dat τ afhangt van de totale doorsnede van de wolke druppeltjes over een wolke kolom, $\sim r^2$, en niet van de hoeveelheid wolke water die wordt bepaald door het volume van de druppeltjes, $\sim r^3$. De fysische interpretatie is dat de kans dat een foton een wolke druppeltje raakt afhangt van de doorsnede van de wolke druppeltjes. Een belangrijke consequentie is dat twee wolken met evenveel wolke water maar met verschillende druppelconcentraties, ook verschillende reflecties geven. Een voorbeeld hiervan zijn zogenoemde scheepssporen (figuur 6). Dit zijn gebieden in een wolkendek met een zichtbaar sterkere reflectie van zonnestraling, veroorzaakt door aerosolen uitgestoten door schepen. Wolke druppeltjes vormen zich in het algemeen op condensatiekernen zoals zoutkristallen of roetdeeltjes. Als eenzelfde hoeveelheid wolke water zich verspreidt over meerdere druppeltjes dan zal de totale doorsnede van het druppeloppervlak toenemen. Laten we een druppel met straal R beschouwen. Deze wolke druppel heeft een volume $4\pi R^3/3$ en oppervlak van een doorsnede πR^2 . Als we deze druppel splitsen in een aantal N kleinere druppeltjes, elk met een zelfde straal r , dan geldt vanwege behoud van massa van het water dat $4\pi R^3/3 = 4N\pi r^3/3$. De straal van de kleine druppeltjes kan dus worden uitgedrukt als $r = R/N^{1/3}$. De totale doorsnede van de kleinere druppeltjes is echter $N\pi r^2 = N^{2/3}\pi R^2$. Bij eenzelfde hoeveelheid wolke water hebben voor $N > 1$ de kleinere druppeltjes in totaal een grotere doorsnede dan een enkele grotere druppel. Een wolkendek gevormd in aerosolrijke lucht zal dus meer zonlicht reflecteren.

Prangende vragen

Kort samengevat kan stratocumulus worden omschreven als een dunne, turbulente wolk met een sterk effect op de reflectie van zonnestraling. We zullen nu kort een aantal actuele onderzoeksthema's bespreken op het gebied van weer, klimaat en de energietransitie waar stratocumulus een prominente rol in speelt.

Stratocumulus in een veranderend klimaat

De concentraties van broeikasgassen in de atmosfeer nemen geleidelijk toe. Daardoor gaat er meer warmtestraling naar het aardoppervlak. Dit resulteert weer in hogere temperaturen aan het grondoppervlak en meer verdamping van water uit de oceanen. In een optimistisch scenario zou dit kunnen leiden tot meer laaghangende wolken in gebieden met sterke thermische inversies. Vanwege de sterke reflectie van invallend zonlicht door laaghangende bewolking zou wereldwijd een paar procent meer stratocumulus al voldoende kunnen zijn om de opwarming ten gevolge van het versterkte broeikaseffect te compenseren [3]. Echter, volgens de wet van Clausius-Clapeyron kan een warmere atmosfeer ook meer waterdamp bevatten en dit effect leidt juist tot minder bewolking. Het zijn precies deze twee tegenovergestelde effecten op de hoeveelheid stratocumulus, namelijk meer vocht en hogere temperaturen, die tot een grote onzekerheid leiden in de sterkte van de opwarming van het toekomstige klimaat [4].

In het EUCLIPSE-project is met finschalige *large eddy simulation*-modellen (LES-modellen) onderzoek gedaan naar de feedback van stratocumulus op globale opwarming [5]. LES-modellen passen de behoudsvergelijkingen van warmte, vocht, impuls en massa toe op een finschalig rooster, met roosterpunten op afstanden van ordegrootte 10 - 100 m. Dat is noodzakelijk om het transport door turbulente wervels te modelleren en het zorgt ook vanzelf voor een betere representatie van de dunne inversielag en de infraroodstralingsafkoe-

ADIABATISCHE TEMPERatuurPROFIELEN

Met behulp van de wet van behoud van energie, de ideale gaswet en de hydrostatische balans kan voor droge lucht worden afgeleid dat de som van de enthalpie $c_p T$ en de potentiële energie ten gevolge van het zwaartekrachtveld constant moet zijn, dus $c_p T + gz = \text{constant}$. Als onbewolkte lucht adiabatisch (dat wil zeggen zonder te mengen met de omgevingslucht) omhoog beweegt, neemt de temperatuur af volgens de droogadiabatische temperatuurgradiënt, $dT/dz = -g/c_p$ (~ -10 K/km). Omdat in een wolk condensatiewarmte vrijkomt moeten we een bronterm van energie meenemen ter grootte van $L_v dq$, met $L_v = 2,5 \cdot 10^6$ J/kg, de latente warmte die vrijkomt bij de condensatie van 1 kg water (q). We vinden hiermee een uitdrukking voor het behoud van *liquid static energy*, $c_p T + gz - L_v q = \text{constant}$. De energie die vrijkomt bij condensatie warmt opstijgende bewolkte lucht sterk op. Daardoor is de nat-adiabatische temperatuurgradiënt (~ -5 K/km) maar half zo groot als de droogadiabaat.

WOLKENWATER

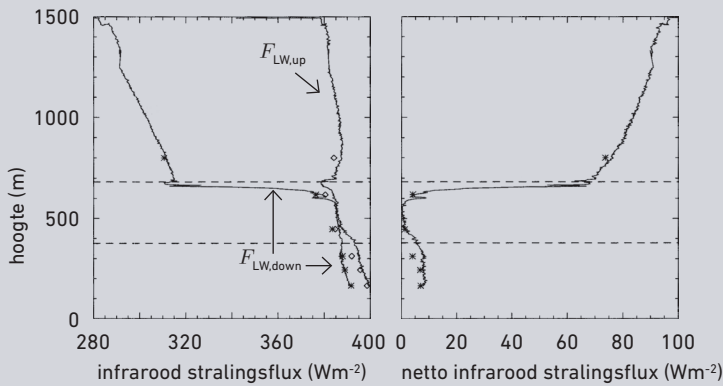
Om een gevoel te krijgen van de grootteorde van de verschillende variabelen geven we hier een paar voorbeelden. De concentraties van wolkendruppels die meevliegtuigen vinden, zijn van de orde van 100 cm^{-3} . Druppeltjes vormen zich op stofdeeltjes en zoutkristallen, zodat als vuistregel de druppelconcentratie lager is in schone lucht – boven oceanen of in de buurt van poolgebieden – en juist hoger boven continenten met veel aerosolen. Met de definitie van de nat-adiabatische temperatuurgradiënt kunnen we afleiden dat de hoeveelheid wolkenwater in lucht van circa 15°C ongeveer met 2 g per kg lucht per kilometer opstijging toeneemt. Een wolk met een dikte van een paar honderd meter bevat ongeveer $0,1 \text{ kg/m}^2$ wolkenwater. Indien we al het wolkenwater van wolkenbasis tot de top opvangen in een glas krijgen we maar 0,1 mm. Toch zorgt meervoudige lichtverstrooiing aan de vele druppeltjes van stratocumulus ervoor dat een wolkendeek met een dikte van slechts 300 m gemakkelijk al de helft van het inkomende zonlicht naar boven reflecteert.

ling aan de top van stratocumulus. De belangrijkste bevinding is dat het effect van opwarming van de onderste laag van de atmosfeer het 'wint', waardoor de dikte van stratocumulus doorgaans afneemt ondanks de toename van de hoeveelheid waterdamp. Dunnere wolken leiden tot meer zonnestraling op aarde en deze positieve feedback versterkt de opwarming van het klimaat [6].

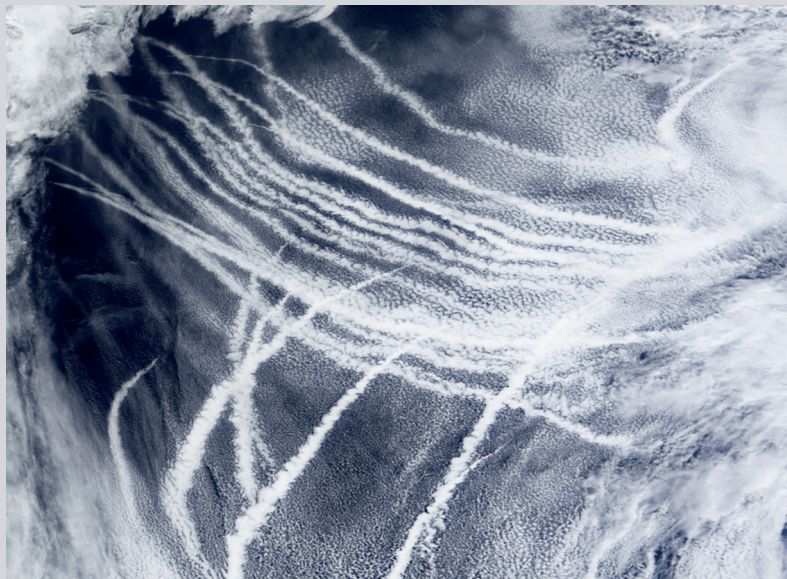
Stratocumulus en de energietransitie

Een nauwkeurige verwachting van de hoeveelheid stratocumulus is van groot belang voor het maken van een betrouwbare schatting van de elektriciteitsproductie uit zonne-energie. Omdat de hoeveelheid wolkenwater in stratocumulus relatief klein is, in het algemeen niet meer dan 0,5 g/kg, leiden relatief kleine fouten in de temperatuur of specifieke vochtigheid, van

de orde van grootte van enkele tienden kelvin of g/kg waterdamp, veelal tot een onderschatting van stratocumulus in modellen voor de weersverwachting. Een relatief nieuwe techniek is het toepassen van LES-modellen op gpu's (*graphic processing units*) voor het verbeteren van korte-termijnweersverwachtingen specifiek voor zonne- of windparken [7]. Het voordeel van LES-modellen is dat de begincondities relatief gemakkelijk kunnen worden aangepast, bijvoorbeeld door gebruik te maken van de recentste metingen van meteorologische grondstations – zoals van temperatuur, vochtigheid en straling – en data uit remote sensing-instrumenten zoals de hoeveelheid water in de wolkenkolom. Dit principe wordt momenteel getest in een samenwerkingsproject tussen de TU Delft en het spin-offbedrijf Whiffle (zie voor een interview met medeoprichter Remco Verzijlbergh NTvN **84-10**).



Figuur 5. Verticale profielen van de opwaartse ($F_{LW,up}$), neerwaartse ($F_{LW,down}$) en netto ($F_{LW,up} - F_{LW,down}$) infrarood stralingsfluxen. De metingen zijn verricht vanuit een Hercules C130-vliegtuig van het Britse Meteorological Research Flight in een stratocumuluswolkendeek nabij de Canarische eilanden. De gestreepte lijnen geven de hoogten weer van de wolkenbasis en -top. De symbolen sterretjes en open ruiten geven de gemiddeldes van metingen weer op een vaste hoogte. Afbeelding: © American Meteorological Society [2]. Geplaatst met toestemming.



Figuur 6. Effecten van emissies uit de scheepvaart op de reflectie van wolken ten zuiden van Alaska, 4 maart 2009. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) op de Aqua-satelliet. Foto: NASA's Earth Observatory.

Stratocumulus en klimaatgeo-engineering

Marine cloud brightening is een idee om de opwarming van het klimaat te verminderen. Het uitgangspunt is relatief eenvoudig. Door zout zeewater in de atmosfeer te sproeien neemt de hoeveelheid condensatiekernen toe. Stijgende luchtstromingen transporteren deze deeltjes naar hogere luchtlagen. Als de lucht vochtig en

koud genoeg is, zal waterdamp condenseren op de zoutkristallen. Hoe meer condensatiekernen er aanwezig zijn, des te groter de concentratie van wolkendruppels en het totale druppeloppervlak. Dit versterkt de reflectie van invallend zonlicht. Omdat uitgestrekte stratocumulusvelden veel voorkomen boven de subtropische oceanen wil men daar deze techniek toepassen. Verschil-

lende groepen onderzoeken of dit op grote schaal tot de gewenste reflectie leidt. De grootste onzekerheden zijn feedbackeffecten op de neerslagvorming en de hoeveelheid turbulente entrainment van warme en droge lucht aan de top van stratocumulus.

Conclusie

Stratocumulus speelt een belangrijke rol in weer en klimaat vooral vanwege de sterke reflectie van de invallende zonnestraling terug naar de ruimte. Modelling van stratocumulus voor weersverwachting en klimaat is lastig, vooral omdat de benodigde schaal veel kleiner is dan die van de huidige rekenroosters. Daarom wordt veel wetenschappelijk onderzoek gedaan met fijnmazige modellen die al lange tijd worden gebruikt voor turbulente stromingen. Numerieke experimenten met deze zogenoemde large eddy simulation-modellen vereisen een enorme rekenkracht en worden daarom veelal gedaan op supercomputers, maar tegenwoordig ook met grafische processoren [8]. Een nieuwe praktische toepassing is het toepassen van LES-modellen op stratocumulus voor het verbeteren van de korte-termijnweersverwachting. NWO financierde het werk aan stratocumulus in het REFORM-project. De auteur dankt Mats Steerneman voor het kritisch doorlezen van de tekst.

REFERENTIES

1. R. Wood, Stratocumulus clouds, *Mon. Weather Rev.* **140**, 2373-2423 (2012).
2. P.G. Duynkerke et al., Microphysical and turbulent structure of nocturnal stratocumulus as observed during ASTEX, *J. Atmos. Sci.* **52**, 2763-2777 (1995).
3. D.A. Randall et al., *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* **65**, 1290-1301 (1984).
4. S. Bony en J.-L. Dufresne, Marine boundary layer clouds at the heart of tropical cloud feedback uncertainties in climate models, *Geophys. Res. Lett.* **32** (2005). doi:10.1029/2005GL023851.
5. S. R. de Roode et al., Large-eddy simulations of EUCLIPSE-GASS Lagrangian stratocumulus-to-cumulus transitions: Mean state, turbulence, and decoupling, *J. Atmos. Sci.* **73**, 2485-2508 (2016).
6. P.N. Blossy et al., Marine low cloud sensitivity to an idealized climate change: The CGILS LES intercomparison, *J. Adv. Model. Earth Syst.* **5**, 234-258 (2013).
7. C. Gilbert et al., Statistical post-processing of turbulence-resolving weather forecasts for offshore wind power forecasting, *Wind Energy* **23-4**, 884-897 (2020).
8. J. Schalkwijk et al., Weather forecasting using GPU-based large-eddy simulations, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* **96**, 715-723 (2015).