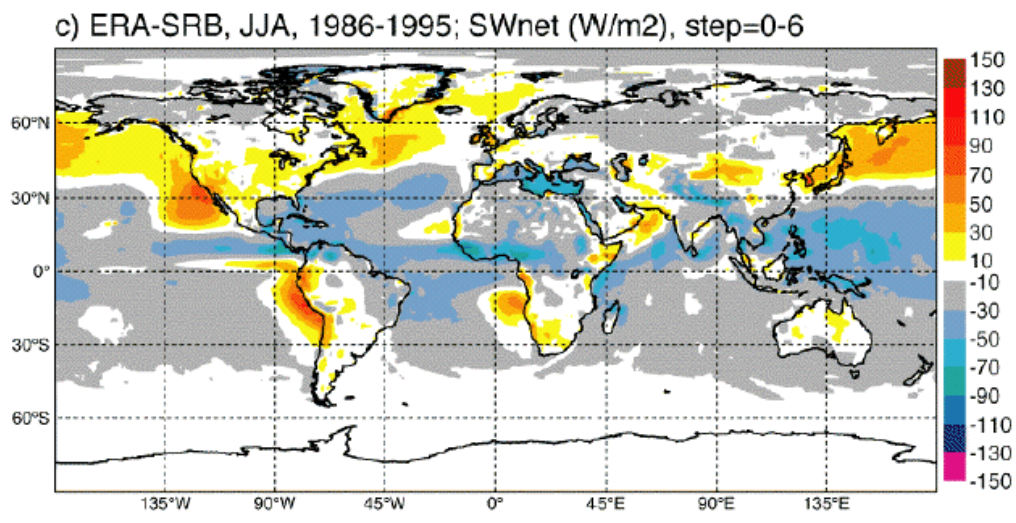


Stratocumulus in weersverwachtingmodellen

Stephan de Roode (IMAU)

Veel weersverwachtingmodellen hebben grote problemen met de representatie van stratocumulus bewolking. Dit blijkt bijvoorbeeld uit verschillen van de netto kortgolvlige straling aan het aardoppervlak volgens ECMWF Re-Analysis (ERA) modelgegevens en waarnemingen (figuur 1). In gebieden waar uitgebreide en persistente stratocumulusvelden zeer regelmatig voorkomen, namelijk ten westen van de kusten van Verenigde Staten, Peru, en zuidelijk Afrika, blijkt te veel kortgolvlige straling het oceaanoppervlak te bereiken. De oorzaak is een onderschatting van de hoeveelheid stratocumulus in het ECMWF model. Voor de kust van Peru zorgt dit voor een behoorlijke fout in de berekening van de oceaantemperatuur, wat bijvoorbeeld nadelig is voor de voorspelling van een eventuele El Niño gebeurtenis. Stratocumulus wolkenvelden worden ook regelmatig bij een noordelijke wind over Nederland geadvecteerd. Deze wolkenvelden ontstaan in het algemeen onder relatief stabiele omstandigheden boven de Noordzee. Een goede voorspelling van de ontwikkeling van stratocumulus is van groot belang omdat het eventueel opbreken van stratocumulus het verschil kan maken tussen een zonnige of een grijze, druilerige dag. In het kader van het door de EU gesponsorde project EUROCS is de afgelopen drie jaar gewerkt aan de verbetering van de representatie van stratocumulus in diverse Europese weersverwachting- en klimaatmodellen (Duynderke et al., 2005). In dit artikel wordt aan de hand van de EUROCS resultaten ingegaan op de vraag waarom stratocumulus wolkenvelden lastig te modelleren zijn. Daarnaast wordt in het kort uiteengezet hoe metingen en fjnschalige modellen worden gebruikt om een beter inzicht in de dynamica en tijdsevolutie van stratocumulus te krijgen.

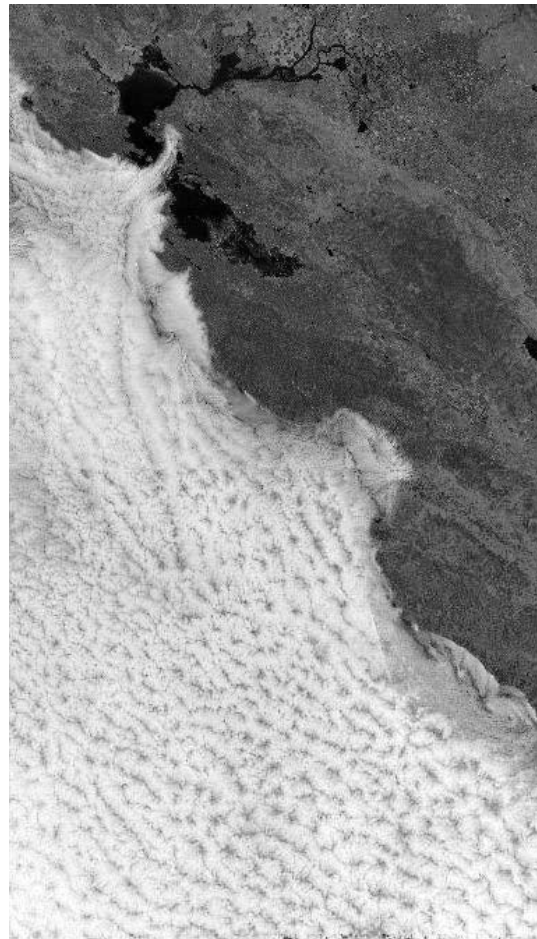


Figuur 1. Het verschil in de netto kortgolvlige straling volgens de ECWMF Re-Analysis data en waarnemingen voor de maanden juni, juli, augustus 1986-1995 (Betts en Beljaars, 2003).

De EUROCS stratocumulus studie - Waarnemingen en modelresultaten

Het gebied ten westen van de kust van Californië is een ideale omgeving voor het houden van meetcampagnes in stratocumulus. Door de ligging van een semi-permanent hogedrukgebied ontstaat namelijk op een hoogte van typisch 500 tot 1000 m een sterke thermische inversie die het van het oceaanooppervlak verdampte vocht effectief ophoopt in de atmosferische grenslaag. Hierdoor ontstaan regelmatig uitgestrekte, persistente stratocumuluswolkenvelden. In het kader van het First ISCCP Regional Experiment (FIRE I, Albrecht et al., 1988) zijn gedurende 14 en 15 juli 1987 in dit gebied vliegtuigmetingen in stratocumulus wolkenvelden verricht (zie figuur 2). In hetzelfde gebied, namelijk op het eiland San Nicolas, zijn verscheidene waarnemingen gedaan, zoals bijvoorbeeld met ballonnen en diverse remote sensing apparatuur.

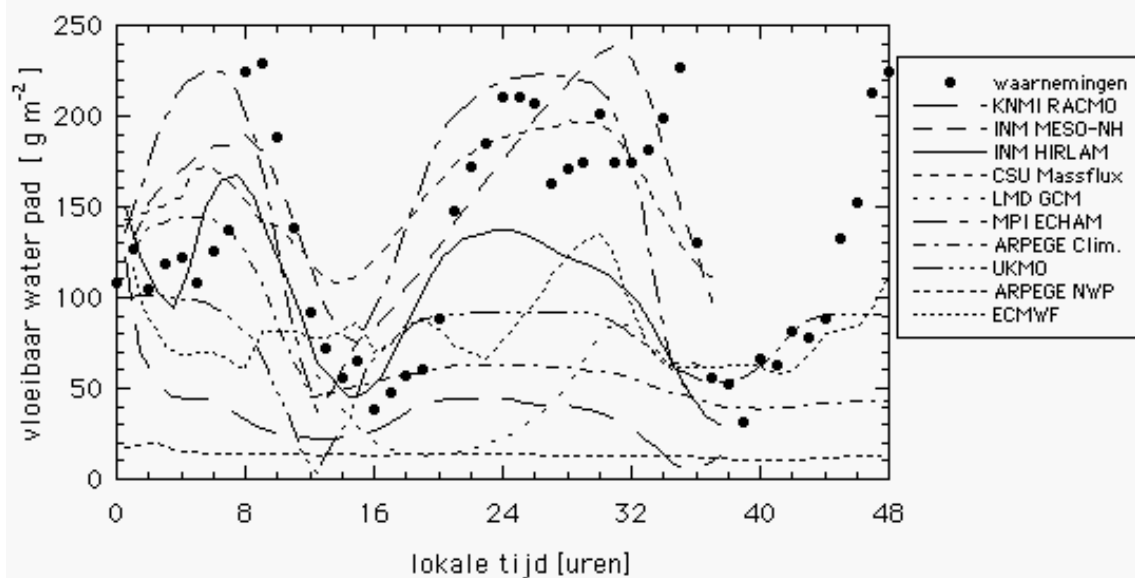
Figuur 2. Landsat satelliet beeld van een stratocumulus wolkenveld ($200 \times 400 \text{ km}^2$) voor de kust van Californië op 14 juli 1987. Het is duidelijk te zien dat de begrenzing van het bewolgingsgebied wordt gemarkeerd door de kustlijn. In dit wolkenveld zijn metingen verricht met behulp van een meetvliegtuig, een kabelballon, radiosondes, en verschillende remote sensing apparaten. Deze gegevens zijn gebruikt voor de initialisatie van een-kolomsversies van verschillende weersverwachtingmodellen, en voor een vergelijking van de modelresultaten.



De FIRE I metingen zijn gebruikt om de kwaliteit van verschillende weersverwachtingsmodellen te testen. Gemeten verticale profielen van vochtigheid, temperatuur en druk zijn gebruikt om zogenaamde een-kolomsversies (zie Kader 1) van operationele modellen te initialiseren. Ook werd de oppervlaktetemperatuur voorgeschreven. Resultaten van de gemodelleerde en gemeten dagelijkse gang van het vloeibaar water pad, dit is de vertikaal geïntegreerde hoeveelheid vloeibaar wolkenwater, zijn te zien in figuur 3. Het vloeibaar water pad is een goede indicator voor de wolkendikte, omdat voor stratocumulus het vloeibaar water pad ongeveer recht evenredig is met de wolkendikte in het kwadraat. Alhoewel sommige modellen een redelijk goede overeenkomst vertonen met de waarnemingen, is het duidelijk dat er tussen de simulaties onderling grote verschillen bestaan. Er zijn relatief veel modellen die het vloeibaar water pad te laag berekenen; dit heeft tot gevolg dat het berekende wolkenalbedo te laag is zodat overdag teveel kortgolvlige straling het aardoppervlak bereikt. Dit is precies de oorzaak van de modelfouten in de ERA resultaten uit figuur 1. Dit leidt tot de vraag wat er zoal mis kan gaan in een model.

Kader 1 Een-kolomsmodellen

In een een-kolomsmodel wordt de toestand van de atmosfeer voor slechts één locatie uitgerekend. Zo'n model heeft dus maar één roosterpunt in een horizontaal vlak. Het effect van horizontale advectie van warmte en vocht kan dus niet direct worden berekend en moet worden voorgeschreven. Verder bevatten een-kolomsmodellen dezelfde rekenmethodes voor het verticale transport, straling en neerslag als het "moedermodel". Een-kolomsmodellen zijn daarom uitstekend geschikt om berekeningsmethoden van verticale transporten van warmte, vocht en impuls, en straling en neerslag te testen aan de hand van vergelijkingen met waarnemingen.



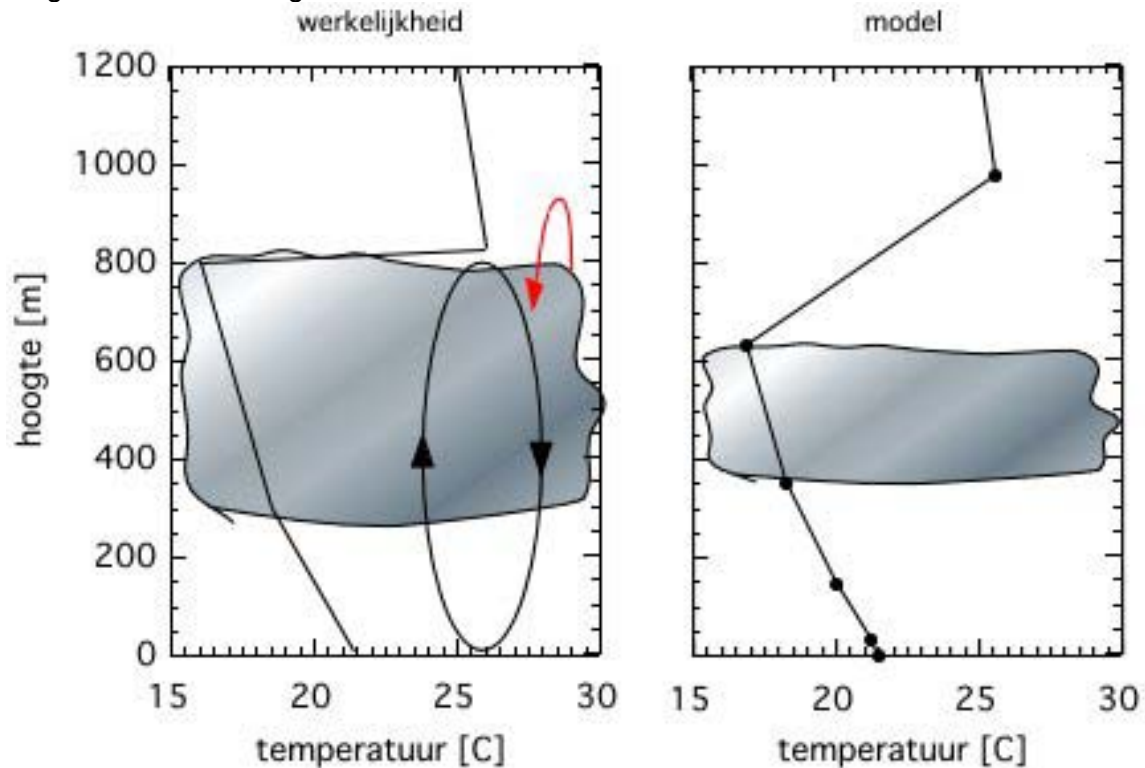
Figuur 3. De gemeten en berekende tijdsevolutie van de verticale geïntegreerde vloeibaar water inhoud (het zogenaamde vloeibaar water pad, aangegeven met zwarte rondjes en gemeten met behulp van een microgolf radiometer). De lijnen geven de resultaten van de een-kolomsversies van verschillende weersverwachtingmodellen. Uit de waarnemingen is een duidelijke dagelijkse gang te zien. Gedurende de nacht wordt het wolkendek dikker, terwijl overdag de wolkendikte sterk afneemt door de absorptie van zonnestraling.

Wat gaat er fout in modellen?

Verticale resolutie

In de meeste grootschalige modellen is de verticale resolutie tamelijk grof. Typisch is deze namelijk minimaal 100 m. In weersverwachting- en klimaatmodellen is de horizontale en verticale resolutie te grof om het transport van warmte en vocht door fjnscalige turbulente wervels in stratocumulus direct uit te rekenen. Dit moet worden uitgerekend met behulp van zogenaamde parameterizaties. Dit zijn slimme rekenregels die gebruik maken van variabelen die wél door het model op elk roosterpunt worden berekend, zoals de gemiddelde temperatuur en specifieke vochtigheid. Figuur 4 laat zien dat een grove verticale resolutie tot een representatieprobleem in modellen leidt. In het voorbeeldmodel zijn slechts twee modelnivo's verzadigd, waardoor de wolkendikte behoorlijk onderschat wordt ten opzichte van de werkelijke toestand. Daarnaast kan de scherpe temperatuursovergang aan de wolkentop niet worden gerepresenteerd. In het

model zal daardoor een minder sterke verticale stabiliteit worden berekend. Omdat in modellen de verticale stabiliteit een maat geeft voor de hoeveelheid vertikaal turbulent transport, is het gemakkelijk te begrijpen dat in een model de uitsmering van de inversie tot grote onnauwkeurigheden leidt.



Figuur 4. Representatie van stratocumulus in een typisch weersverwachtingmodel. Het linkerplaatje laat een schematische weergave van het werkelijke temperatuurprofiel zien. De cirkel is een schematische weergave van een turbulente wervel. De kromme pijl aan de wolken top representeert de turbulente inmenging van relatief warme en droge lucht van boven de inversielaag. In het rechterplaatje zijn de roosterpunten van het model aangegeven met zwarte rondjes. Door de grove resolutie ligt in het model de wolkenbasis hoger en de wolken top lager in vergelijking met het werkelijke wolkendek. Daarnaast wordt de dikte van de thermische inversie, waarin temperatuurssprongen van wel 15°C over een hoogte van slechts enkele tientallen meters kunnen plaatsvinden, behoorlijk uitgesmeerd.

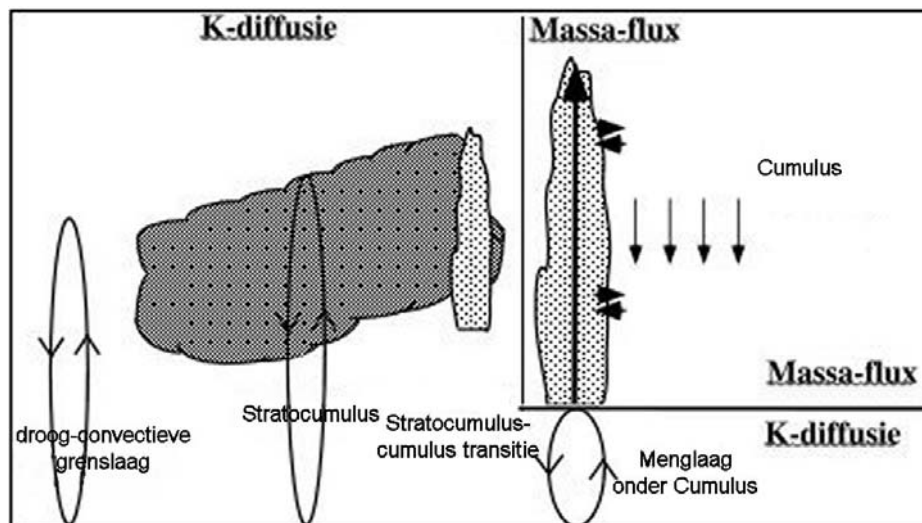
Turbulente menging aan de wolken top

Stratocumulus wolkenlagen zijn behoorlijk turbulent. Stratocumulus is in het algemeen (optisch) dik genoeg is om als een zwart lichaam te stralen, en omdat de heldere atmosfeer erboven een veel lagere emissiviteit heeft, emitteert stratocumulus meer langgolvlige (infrarode) straling dan het absorbeert van bovenaf. Dit betekent natuurlijk verlies van energie, wat zich uit in een sterke afkoeling aan de wolken top. Afgekoelde luchtpakketjes zullen door hun hogere dichtheid gaan zinken, waardoor de langgolvlige stralingsafkoeling aan de wolken top een belangrijke motor is voor het aandrijven van turbulentie. Daarnaast wordt turbulentie ook gegenereerd door verdamping en condensatie van wolkendruppeltjes. Een belangrijk effect van de turbulentie is dat luchtpakketjes van boven de thermische inversie het wolkendek worden ingemengd. Dit proces wordt "entrainment" genoemd. Omdat de lucht boven de wolk relatief warm en droog is, leidt entrainment tot een afname van de wolkendikte. Of het wolkendek

werkelijk dunner wordt hangt echter ook af van de afkoeling door het langgolvlige stralingsverlies, de hoeveelheid zonnestraling die wordt geabsorbeerd, en de grootte van warmte- en vochtfluxen aan het oppervlak. De grote onbekende in een model is echter de zogenaamde entrainment snelheid. Dit is de snelheid waarmee relatief warme en droge lucht van vlak boven de inversie door turbulentie het wolkendek wordt ingemengd.

Cumulus of stratocumulus?

In de meeste weersverwachtingmodellen worden de verticale turbulente transporten in de grenslaag, zoals door stratocumulus, op een andere manier uitgerekend dan voor cumulus (figuur 5). In zulke modellen moet dan bij elke rekentijdstap een beslissing worden genomen welke van de twee rekenmodules moet worden aangeroepen. Voor de simulaties van de EUROCS stratocumulus studie blijkt dat het cumulus-schema soms wordt geactiveerd, ondanks dat er tijdens het meetexperiment geen cumuli zijn geobserveerd. Dit heeft tot gevolg dat stratocumulus geleidelijk oplost omdat in het model teveel vocht naar hogere luchtlagen wordt afgevoerd. Dit probleem is gedeeltelijk te wijten aan een grove verticale resolutie. Zoals uit figuur 4 blijkt, wordt tussen twee roosterpunten de thermische inversie in het model behoorlijk uitgesmeerd. Dit betekent dat in het model een foute verticale stabiliteit wordt berekend. Dit veroorzaakt behoorlijke fouten in de berekening van verticale turbulente fluxen van warmte en vocht, omdat die namelijk sterk afhankelijk zijn van de lokale verticale stabiliteit.



Figuur 5. Schematische weergave van de berekeningsmethoden van turbulent transport in een weersverwachting- of klimaatmodel. Turbulentie in een onbewolkte atmosfeer of in stratocumulus wordt berekend met behulp van een zogenaamd K-diffusie schema. De grootte van het verticale transport van bijvoorbeeld variabelen zoals warmte, vocht of de hoeveelheid luchtverontreiniging hangt dan af van de intensiteit van de turbulentie en de gemiddelde verticale gradiënt van de variabele. Een K-diffusie schema heeft als eigenschap dat het verticale gradiënten gladstrijkt, en is daarom uitstekend geschikt als rekengereedschap voor de atmosferische grenslaag die vertikaal goed gemengd is. Omdat in een cumuluslaag slechts hier en daar turbulent transport in wolken plaatsvindt, is deze laag niet goed vertikaal gemengd en moet een ander zogenaamd "massa-flux" rekenschema worden toegepast. Soms worden in modellen de verkeerde rekenschema's aangeroepen, zodat bijvoorbeeld het transport in stratocumulus met een massa-flux schema wordt bepaald. Dit zal dan leiden tot een overmatig transport van warmte en vocht naar de vrije atmosfeer en vervolgens het oplossen van het stratocumulus wolkendek.

Voor het modelleren is er echter een veel fundamenteeler probleem. Het is namelijk nog niet goed begrepen onder welke voorwaarden stratocumulus opbreekt in cumulus of omgekeerd. Tijdens de maand juli in 1993 werd uit het Atlantic Stratocumulus Transition EXperiment (ASTEX, Albrecht et al. 1995) in de Azoren de suggestie gewekt dat de inversiestabiliteit een belangrijke indicator is voor het opbreken van stratocumulus. De stabiliteit wordt bepaald door de vocht- en temperatuursprongen over de inversie, waarbij geldt dat naarmate de inversielucht droger en kouder is, stratocumulus sneller zou kunnen opbreken door turbulente inmenging van deze lucht (zie Kader 2). In tegenspraak hiermee zijn recente metingen voor de kust van Californië (The Dynamics and Chemistry of Marine Stratocumulus, DYCOMS II, Stevens et al. 2003). Dit experiment heeft juist aangetoond dat onder een vergelijkbare inversiestabiliteit, persistente stratocumulus wolkenvelden kunnen voorkomen.

Kader 2 Menging door afkoeling wolkentop

Als koude en vochtige wolkenlucht mengt met droge (onverzadigde) en warme inversielucht kunnen er mengpakketjes ontstaan die kouder zijn dan de wolk zelf. Dit type mengproces wordt "buoyancy reversal" genoemd. De netto afkoeling kan worden veroorzaakt als er voldoende wolkendruppeltjes na menging met de warme, onverzadigde inversielucht zullen verdampen. Hoe droger de lucht uit de inversie, des te meer druppeltjes kunnen verdampen, en des te groter de kans dat het mengpakketje kouder zal zijn dan de wolk. Hoe kan dit proces leiden tot het opbreken van stratocumulus? De sterk afgekoelde mengpakketjes zullen gaan zakken onder invloed van hun hogere dichtheid, wat leidt tot een versterking van de turbulentie in een wolk. Een versterking van de turbulentie leidt weer tot meer inmenging van droge en warme inversielucht, zodat het wolkendek geleidelijk dunner wordt.

Wat moet er verbeterd worden?

De entrainmentsnelheid blijft een zeer kritiek punt in het modelleren van stratocumulus. Deze snelheid is bijvoorbeeld afhankelijk van de grootte van de temperatuursprong aan de inversie, maar ook van de vochtsprong. Er geldt dat hoe groter de temperatuursprong is, des te minder entrainment er zal plaatsvinden omdat turbulente wervels minder gemakkelijk in de inversielaag kunnen doordringen. Het omgekeerde geldt voor de sprong van vocht over de inversie. Als de lucht boven de wolk namelijk heel droog is, kan door entrainment van deze lucht verdamping van druppeltjes aan de wolkentop plaatsvinden, wat vervolgens tot een extra afkoeling leidt. Deze afkoeling versterkt de turbulentie in de wolk omdat koudere luchtpakketjes sneller naar beneden zullen zakken. In het algemeen kan gesteld worden dat hoe droger de lucht is, des te meer entrainment door turbulentie kan worden gegenereerd. Alhoewel er in de afgelopen tien jaar veel kennis vergaard is over hoe de entrainmentsnelheid het best geparаметriseerd kan worden, zijn de onderlinge verschillen in voorgestelde berekeningsmethoden nog te groot om over een echte doorbraak te spreken.

Een deel van de problemen die worden ondervonden met stratocumulus zouden kunnen worden opgelost door simpelweg de verticale resolutie te verhogen. Dit leidt echter tot een veel grotere rekentijd. Een truc die kan worden toegepast is het toevoegen van een extra wiskundige vergelijking voor de wolkentophoogte. Op die manier kan namelijk de wolkentop op een natuurlijke manier tussen twee verticale roosterpunten liggen. Een belangrijk voordeel van deze methode is een nauwkeurigere schatting van de wolkendikte, wat uiteraard van belang is voor allerlei stralingsberekeningen. Ook voor

deze methode geldt echter dat een nauwkeurige parameterizatie van de entrainment snelheid cruciaal is, voornamelijk omdat een verandering in de wolkentophoogte afhangt van de entrainment snelheid.

Stratocumulus wolkenvelden worden ook vaak bestudeerd met behulp van de meest geavanceerde modellen die voor de berekening van atmosferische turbulentie beschikbaar zijn, namelijk zogenaamde Large-Eddy Simulation (LES) modellen. Dit zijn fjnschalige drie-dimensionale modellen die de relevante fysische vergelijkingen numeriek oplossen. De typische roosterafstand bedraagt zo'n 10 tot 50 m. LES resultaten worden vaak gebruikt als basis voor de verbetering van rekenmodules in weersverwachtingmodellen. Dit gebeurt pas nadat een simulatie van een geselecteerde casus uit een meetcampagne goed overeen blijkt te komen met de waarnemingen, waarna vervolgens nieuwe simulaties kunnen worden gemaakt waarbij systematische veranderingen worden toegepast in inputvariabelen zoals bijvoorbeeld de oppervlaktefluxen van warmte en vocht, de wolkendikte, en de inversiesprongen van vocht en temperatuur. Op deze manier kan een LES model worden gebruikt om 'rekenregels' voor grootschalige modellen af te leiden.

LES modellen zijn ook gebruikt om het EUROCS stratocumulus wolkendek te simuleren. Net als bij voorgaande stratocumulus LES modelvergelijkingsstudies, laten verschillende LES simulaties van de EUROCS stratocumulus studie een behoorlijk goede onderlinge overeenkomst zien. Worden dezelfde modellen echter toegepast op het wolkendek gemeten tijdens DYCOMS II, dan blijken de berekende wolkendiktes een grote spreiding te vertonen die vergelijkbaar is met de resultaten zoals volgens de weersverwachtingmodellen uit figuur 1 (Stevens et al., 2005). Sommige LES-modellen, waaronder het model dat gebruikt wordt door het IMAU en het KNMI, simuleren een wolkendek dat snel opbreekt en overgaat in cumulus, terwijl de metingen juist een persistent wolkendek aantonen. De verschillen tussen deze modellen en de waarnemingen zijn vooral te wijten aan verschillen in de intensiteit van de turbulentie in wolkenlaag, waardoor in de modellen te veel droge en warme lucht door entrainment in het wolkendek wordt gemengd.

CONCLUSIE

Simulaties van stratocumulusbewolking door verschillende weersverwachtingmodellen die hebben geparticipeerd in de EUROCS stratocumulus studie laten een grote spreiding in de resultaten van de wolkendikte zien. Dit komt gedeeltelijk door een grove verticale resolutie in de grenslaag. Daarnaast is de berekening van de entrainment snelheid van belang voor de evolutie van de wolk. Door verschillende meetcampagnes en het gebruik van fjnschalige Large-Eddy Simulatie (LES) modellen is in de afgelopen tijd een veel beter inzicht verkregen in het entrainment proces. Recente metingen in een persistent stratocumulus wolkendek tijdens DYCOMS II laten echter zien dat er onder bepaalde omstandigheden inconsistenties zijn tussen de waarnemingen en fjnschalige LES modellen. Omdat resultaten van deze LES modellen vaak gebruikt worden voor de verbetering van rekenmodules in weersverwachtingmodellen, is het duidelijk dat de representatie van bepaalde stratocumulus wolkenvelden voorlopig een probleem zal blijven voor grootschalige modellen. Vanwege het belang van stratocumulus voor de weersverwachting, de berekening van El Niño en klimaatstudies heeft het onderzoek naar stratocumulus nog steeds een hoge prioriteit in de internationale onderzoekswereld.

Literatuur

Albrecht B. A., D. A. Randall and S. Nicholls, 1988: Observations of marine stratocumulus clouds during FIRE, Bull. Am. Meteor. Soc., 69 , 618-626.

Albrecht B. A., C. S. Bretherton, D. Johnson, W. H. Schubert, and A. S. Frisch, 1995: The Atlantic stratocumulus transition experiment - ASTEX, Bull. Am. Meteor. Soc., 76 , 889-904.

Betts, A. K., en A. C. M. Beljaars, 2003: ECMWF ISLSCP-II near-surface dataset from ERA-40. ERA-40 Project Report Series no. 8.

Duynkerke, P. G., S. R. de Roode en 18 co-auteurs, 2005: Observations and numerical simulations of the diurnal cycle of the EUROCS stratocumulus case. Verschijnt binnenkort in de Quart. J. R. Met. Soc. EUROCS special issue.

Stevens, B. en 16 co-auteurs, 2005. Evaluation of Large-Eddy Simulations via Observations of Nocturnal Marine Stratocumulus. Verschijnt binnenkort in de Monthly Weather Review.

Stevens, B. en 31 co-auteurs, 2003: Dynamics and chemistry of marine stratocumulus - Dycoms-II, Bull. Am. Meteor. Soc., 84 , 579-593.