

# Turbulente nachten in het klimaat

BERT HOLTSLAG, GERT-JAN STEENEVELD, ARNOLD MOENE EN BAS VAN DE WIEL (WAGENINGEN UNIVERSITEIT)

Studies met modellen naar de toestand van een toekomstig klimaat laten veelal een (sterke) opwarming zien bij een toename van de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer. Het grootste deel van de verwachte opwarming lijkt daarbij plaats te vinden onder stabiele omstandigheden nabij het aardoppervlak boven land en ijs. Dit zijn omstandigheden die zich typisch in de nacht voordoen, maar in de winter komen stabiele omstandigheden boven land ook veelvuldig voor gedurende de hele dag (vanwege de geringe zonnestraling en hoge uitstraling). Helaas blijkt dat juist onder stabiele omstandigheden atmosferische modellen relatief grote afwijkingen vertonen ten opzichte van waarnemingen. Ook blijken modellen in stabiele omstandigheden erg gevoelig te zijn voor details in de formulering van de uitwisseling van warmte en impuls tussen het aardoppervlak en de atmosfeer. In dit artikel geven we een overzicht van de huidige stand van zaken en bespreken we de eerste resultaten van een internationale vergelijkingsstudie van modellen georganiseerd binnen de GEWEX<sup>1</sup> Atmospheric Boundary Layer Study (GABLS, zie URL1).

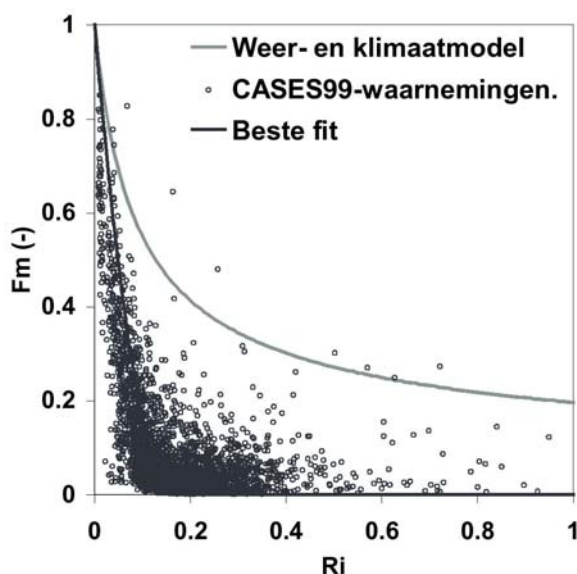
## De nachtelijke grenslaag boven land

Onder nachtelijke omstandigheden koelt het aardoppervlak af door netto langgolvlige uitstraling. Deze afkoeling is het sterkst bij onbewolkt weer. De atmosfeer wordt dan stabiel gelaagd, dat wil zeggen dat de potentiële temperatuur toeneemt met de hoogte. Hierdoor wordt de turbulente warmteflux naar het oppervlak gericht. Deze negatieve warmteflux

onderdrukt de turbulentie, waardoor het transportmechanisme voor warmte (en impuls en massa) wordt tegengewerkt en soms zelfs wegvalt. Daardoor kan bij lage windsnelheden de koppeling tussen de atmosfeer en het landoppervlak geheel wegvallen of juist afwisselend ontkoppelen en terugkoppelen (hetgeen leidt tot intermitterend gedrag, zie van de Wiel et al, 2002). Daarnaast zijn andere verschijnselen van belang, zoals stra-

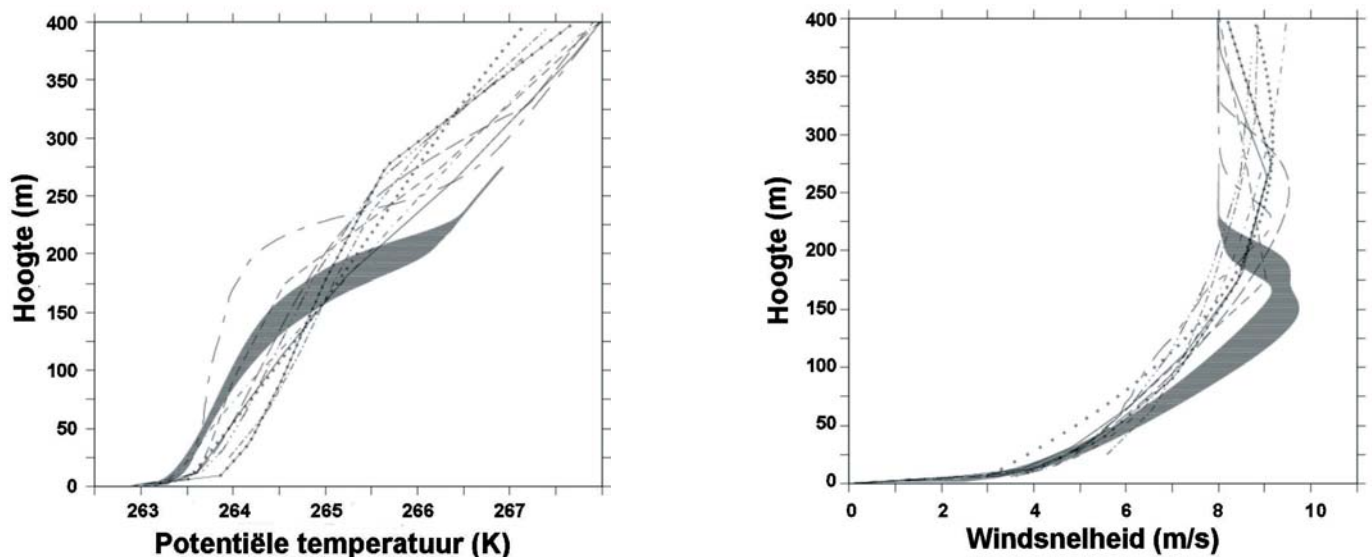
lingsdivergentie, zwaartekrachtsgolven, dichtheidsstromingen, en kunnen effecten van ruimtelijke heterogeniteit een belangrijke rol spelen. Al met al ontstaat zo een complexe wisselwerking van verschillende processen op kleine schaal. Dit bemoeilijkt ook de verwachting van vorst aan de grond en mist.

De representatie van de genoemde processen in de stabiele grenslaag in groot-schalige weer- en klimaatmodellen is sterk vereenvoudigd en schiet daardoor vaak tekort. Ter illustratie laat figuur 1 (zie achterzijde) het verschil zien voor de twee metertemperatuur tussen het RACMO2-model (een model met de dynamica van het HiRLAM-model en de fysische parametrisaties van het ECMWF-model) en waarnemingen voor het winterseizoen gedurende een periode van 30 jaar in het huidige klimaat. De systematische afwijking in noord Scandinavië valt direct op en deze bedraagt zelfs 6 K of meer! Naast het systematische verschil wordt de amplitude van de dagelijkse gang ook onderschat (Lenderink et al, 2003). Deze verschillen worden gedeeltelijk veroorzaakt doordat aan de randen het RACMO2 model geforceerd is met de uitkomsten van een mondiaal klimaatmodel. Daarnaast spelen binnen het model de turbulente menging,



Figuur 2. Meng-efficiëntie  $F_m$  als functie van het Richardsongetal ( $Ri$ ) als maat voor de stabiliteit: zoals bepaald uit CASES99-waarnemingen (met dank aan Oscar Hartogensis), een beste fit door de data (van de vorm  $F_m = (1 - a Ri)^2$ , zwarte lijn) en een functie zoals in operationele modellen wordt gebruikt (grijze lijn).

<sup>1</sup> GEWEX: Global Energy and Water Cycle Experiment (zie URL2).



Figuur 3. Profielen van a. potentiële temperatuur (links) en b. windsnelheid (rechts) gebaseerd op resultaten met kolomversies van operationele weer- en klimaatmodellen (na negen uur simulatie). Het grijs gearceerde gebied geeft het ensemble van de LES modellen aan (uit Cuxart et al, 2005).

het wolkschema en stralingstransport, maar ook landoppervlakte processen een rol.

### De grenslaag in modellen

Gevoeligheidsstudies met het ECMWF-model en het Hadley Centre klimaatmodel, hebben laten zien dat kleine veranderingen in de manier waarop turbulente menging in modellen wordt beschreven kunnen leiden tot grote veranderingen in de oppervlaktetemperatuur boven land (en ijsoppervlakken) tijdens wintermaanden. Dit heeft een belangrijke invloed op de middellange termijnweersverwachtingen en op simulaties van het klimaat (Viterbo et al, 1999; King et al, 2001). De berekende turbulente wrijving die de lucht in het model aan het aardoppervlak ondervindt, hangt af van de manier waarop de stabiele grenslaag in het model is geformuleerd.

De meeste operationele modellen voor weer en klimaat gebruiken voor de representatie van turbulente menging de ‘flux-gradient’ hypothese (ook wel K-theorie geheten). De evenredigheidsfactor tussen de flux en de gradiënt wordt de diffusiecoëfficiënt  $K$  genoemd. Voor wind geldt dat  $K_m$  ( $m^2 s^{-1}$ ) kan worden geschreven als

$$K_m = l_m^2 \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right| F_m$$

waarin  $l_m$  een lengte is,  $\partial U/\partial z$  de verticale windsnelheidsgradiënt is en  $F_m$  een correctiefunctie is voor de stabiliteit. De definitie van  $l_m$  en de vorm van  $F_m$  zijn hierbij cruciaal. Figuur 2 laat zien hoe sterk de menging ( $F_m$ ) wordt

beperkt wanneer de stabiliteit toeneemt. De punten en de zwarte lijn zijn afgeleid uit waarnemingen van het CASES99 veldexperiment, terwijl de grijze lijn het verband tussen  $F_m$  en de stabiliteit toont zoals dat typisch in modellen wordt gebruikt. Hierbij staat  $Ri$  voor het Richardsongetal, een maat voor de stabiliteit. Een grote  $F_m$  betekent veel menging. Het is duidelijk dat de waarnemingen van de CASES99-campagne aangeven dat er minder menging is dan in de huidige modellen wordt gebruikt, met name voor hoge stabiliteit (hoge  $Ri$ ). Dit resultaat wordt niet alleen met behulp van deze data gevonden, maar geldt ook voor andere datasets.

Eén van de redenen om in modellen extra menging toe te passen is dat ze anders, onder extreem stabiele omstandigheden, op onrealistische wijze kunnen ontkoppelen. Dan ontstaat zogenaamde *run-away cooling*: grote stabiliteit onderdrukt menging, hetgeen de koeling vergroot, waardoor vervolgens de stabiliteit nog groter wordt en de menging nog sterker vermindert (positieve terugkoppeling). Hoewel dit type positieve terugkoppeling in werkelijkheid ook een rol kan spelen, is men er tot dusver niet in geslaagd dit op een realistische wijze te simuleren.

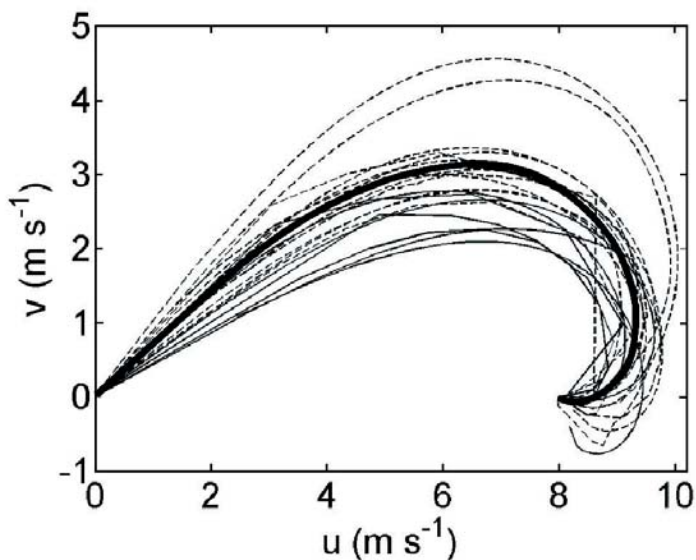
Verder hebben veel grootschalige modellen meer menging en meer wrijving nodig (dan op basis van lokale waarnemingen mag worden verwacht) om ervoor te zorgen dat depressies op gematigde breedte boven land voldoende snel opvullen door ‘Ekman’-damping (Beljaars en Viterbo, 1998; Svensson and Holtslag, 2005).

Kennelijk worden operationele modellen afgeregeld met het turbulentschema om een goede uitkomst te krijgen van de grootschalige kenmerken van de atmosfeer. Dit heeft zijn prijs, want dit gaat ten koste van een correcte representatie van het landoppervlak en de atmosferische grenslaag.

### De eerste internationale vergelijkingsstudie van GABLS

Om grenslaagprocessen beter te begrijpen en te representeren in regionale en grootschalige klimaatmodellen is de GEWEX-Atmospheric Boundary Layer Study (GABLS) gestart (Holtslag, 2003). Als eerste activiteit is een vergelijkingsstudie opgezet voor een Arctische ( $73^\circ$  NB) grenslaag boven ijs, gekarakteriseerd door een geostrofische wind van 8 m/s (Kosovic and Curry, 2000). Aan het begin van de simulatie is de potentiële temperatuur tot 100 meter hoogte constant (265 K) en neemt daarboven toe met 1K per 100 meter. Het initiële windprofiel is logaritmishtot 100 meter hoogte en constant daarboven (gelijk aan de geostrofische wind). De grenslaag wordt van onderaf gekoeld door de oppervlaktetemperatuur met 0.25 K per uur te laten afnemen. Verder wordt uitgegaan van een droge atmosfeer, dus verdamping en condensatieprocessen blijven voor het gemak buiten beschouwing.

Deze exercitie is uitgevoerd met behulp van twee typen modellen. Het eerste type model omvat zogenaamde ‘Large Eddy Simulatie’ (LES) modellen. LES wordt gezien als een numeriek atmosferisch laboratorium waarin turbulente



Figuur 4. Hodogram voor de horizontale windsnelheden ( $v$  en  $u$ ) van alle modelresultaten in de GABLS vergelijkingstudie. De LES referentie is weergegeven als de dikke getrokken lijn in het midden van de modelresultaten, de operationele modellen zijn weergegeven met gestreepte lijnen en de onderzoeksmodellen met dunne getrokken lijnen (uit Svensson en Holtslag, 2005).

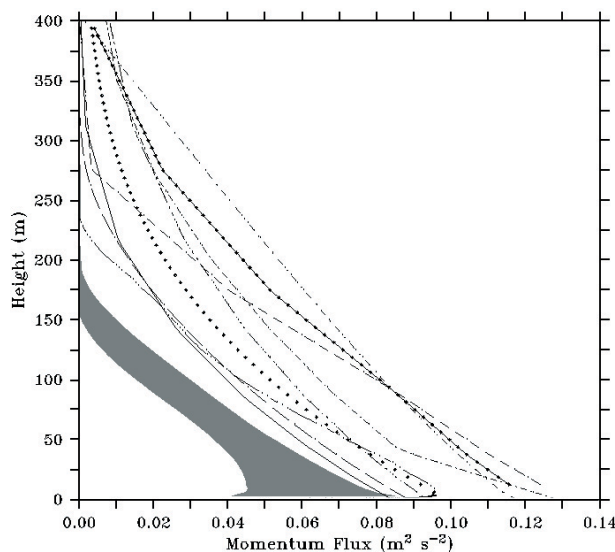
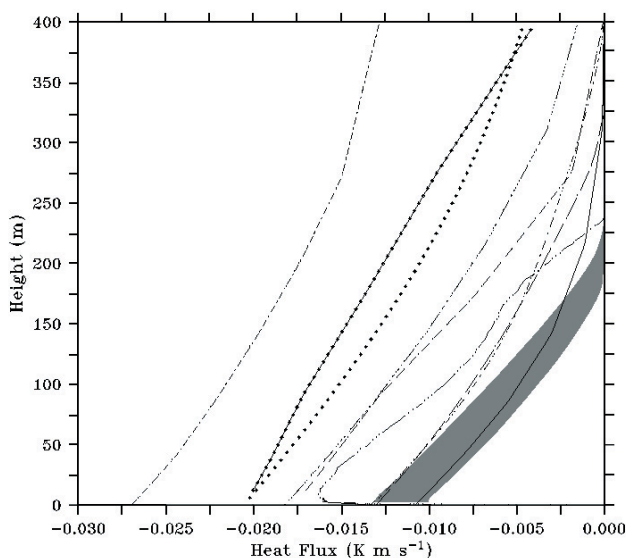
stromingen kunnen worden nagebootst op hoge resolutie. Deze modellen berekenen expliciet de evolutie in de tijd van turbulente wervels groter dan de roosterafmeting (in deze studie variërend van 1 tot 12.5 meter). Turbulentie op kleinere schaal dan de roosterafmeting, wordt via een zogenaamd subgrid-model geparаметeriseerd. Deze techniek vergt zeer veel rekentijd en is dus kostbaar. Anderzijds geeft ze wel de mogelijkheid om coëfficiënten van de turbulentieschema's (zoals gebruikt in weer- en klimaatmodellen) te bepalen die niet of nauwelijks uit veldwaarnemingen te achterhalen zijn. Voor stabiele atmosferische stromingen is deze techniek pas de laatste tien jaar redelijk ontwikkeld. In totaal hebben 10 LES-modellen meegedaan met de verge-

lijkingstudie (waaronder een simulatie door een van de auteurs). De gemiddelde ('ensemble') resultaten van de verschillende LES-modellen worden hieronder als referentie genomen om het tweede type model te toetsen onder dezelfde gecontroleerde omstandigheden.

Het tweede type model is gebaseerd op een verticale kolom van een operationeel weer- of klimaatmodel. Deze modellen proberen de turbulentie niet tot in detail na te bootsen, maar beschrijven het netto effect van de turbulente en andere kleinschalige processen met behulp van grootheden die in het model bekend zijn. De meeste modellen zijn gedraaid met een hoge verticale resolutie van 6.25 meter en hebben een tijdstap van 10 seconden

(verder 'onderzoeksmoedellen' genoemd). Sommige operationele weer- en klimaatmodellen gebruiken hun normale operationele configuratie (met minder resolutie; hierna 'operationele modellen' genoemd). Deze laatste groep modellen omvat onder andere modellen van ECMWF, KNMI, NCEP, Météo France, en het Met. Office. Na een simulatie van negen uur worden de modelvelden verzameld en vergeleken. In totaal hebben negentien kolommodellen deelgenomen (waaronder modellen in gebruik bij de auteurs). Vanwege ruimtegebrek zullen we alleen de resultaten weergeven van de operationele modellen (resultaten van de andere modellen zijn te vinden op URL1).

Het 'ensemble' van de resultaten voor de LES-modellen (na negen uur simulatie) zijn weergegeven in de grijs-gearceerde gebieden in figuren 3a en 3b voor het profiel van respectievelijk de potentiële temperatuur en de windsnelheid (Cuxart et al, 2005). De LES-modellen vertonen relatief weinig spreiding, zeker vergeleken met de resultaten van de operationele modellen (de andere lijnen in figuur 3). Alle LES-modellen berekenen een windmaximum aan de top van de grenslaag (low-level-jet) van circa 9 tot 9.5 m/s. De grootste spreiding in de wind- en temperatuurprofielen is te vinden aan de top van de grenslaag, waar de stabiele gelaagdheid het sterkst is (ook groter dan aan het oppervlak in dit geval). De spreiding in de LES-modellen wordt veroorzaakt door verschillende formuleringen in de subgrid-parametrisatie, maar het blijkt dat de LES-modelresultaten voor  $F_m$  goed overeen komen met de



Figuur 5. Profielen voor a. de warmteflux (links) en b. de impulsflux (rechts) na negen uur simulatie voor de operationele kolommodellen. Het grijs gearceerde gebied geeft het ensemble van de LES-modellen aan (uit Cuxart et al, 2005).

getrokken zwarte lijn in figuur 2. De LES-resultaten zijn dus consistent met de CASES99-waarnemingen en ook met theoretische beschouwingen (Nieuwstadt, 1984). Wel blijken de resultaten afhankelijk te zijn van de resolutie. In diverse LES-modellen is de resolutie gevarieerd van 12.50 meter tot 1 meter en pas bij een zeer hoge resolutie van 1 tot 2 meter trad een redelijke convergentie in de resultaten op (zie verder URL1 en Beare et al, 2005).

De operationele modellen blijken veel dikkere grenslagen te produceren dan de LES-modellen. Dit is te zien aan de hoogte waarop de inversie boven de grenslaag begint (figuur 3a) en de hoogte waarop de low-level-jet zich bevindt (figuur 3b). Verder blijken de meeste operationele modellen niet in staat om de scherpe inversie aan de top van de grenslaag te genereren. In tegenstelling tot de operationele modellen, blijken onderzoeksmodellen grenslagen te produceren die in het algemeen veel dicht bij de LES-resultaten liggen (niet getoond, zie URL1). Figuur 4 toont de variatie van de windcomponenten (en daarmee dus de draaiing van de wind) met de hoogte voor de verschillende modellen in een hodogram (Svensson and Holtslag, 2005). Opvallend is dat er een grote variatie bestaat in de representatie van de winddraaiing met de hoogte in de verschillende modellen. De operationele modellen geven doorgaans een te kleine hoek tussen de wind aan het oppervlak en de geostrofische wind (vanwege de te sterke menging).

In de figuren 5a en 5b zijn de resultaten gegeven voor de profielen van de turbulente warmtestroom en de impulsflux. De uitkomsten voor de kolommodellen laten een enorme spreiding zien, veel groter dan de spreiding in de LES-resultaten. Verder blijken de operationele modellen slechts in één richting af te wijken van de LES-modellen en wel zo dat deze de menging sterk overschat-

ten. Opvallend is ook de enorme variatie in oppervlaktefluxen, zelfs voor deze eenvoudige opzet! De vorm van de fluxprofielen komt echter wel goed overeen.

### Conclusie en vooruitblik

De representatie van de stabiele grenslaag in grootschalige modellen is onvolledig, niet in overeenstemming met lokale waarnemingen en erg gevoelig voor bepaalde modelparameters. Voor een (relatief eenvoudige) vergelijkingsstudie geven de LES-modellen een bescheiden spreiding, terwijl de kolommodellen grote verschillen in menging vertonen. Operationele modellen (zoals van ECMWF, KNMI, NCEP, Météo France, MetOffice) laten een veel sterkere menging zien dan onderzoeksmodellen en LES-modellen. Verticale resolutie blijkt (in de besproken opzet althans) nauwelijks van invloed voor de kolommodellen, maar juist wel voor de LES-modellen.

Hoe relatief simpel deze eerste GABLS-vergelijkingsstudie ook is geformuleerd (voorgeschreven oppervlaktetemperatuur en hoge windsnelheid), het levert al behoorlijk veel variatie op. De volgende stap in GABLS zal een nieuwe vergelijkingsstudie zijn die gebaseerd is op "echte" waarnemingen, waarbij ook nachten worden bekeken met lagere windsnelheden. Hierbij zal ook een koppeling met het landoppervlak moeten worden gemaakt, zodat ook het verschijnsel van run-away-cooling nader kan worden onderzocht. Dan komen ook processen als stralingsdivergentie en resolutiegevoeligheid weer om de hoek kijken.

Door de Nederlandse Onderzoeksorganisatie NWO is onlangs een onderzoeksprogramma gehonoreerd om de rol en parameterisatie van de stabiele grenslaag in klimaatmodellen verder te beschouwen en te verbeteren. Dit programma zal worden uitgevoerd door de auteurs in

samenwerking met Fred Bosveld, Geert Lenderink en Peter Baas van het KNMI.

### Dankbetuiging

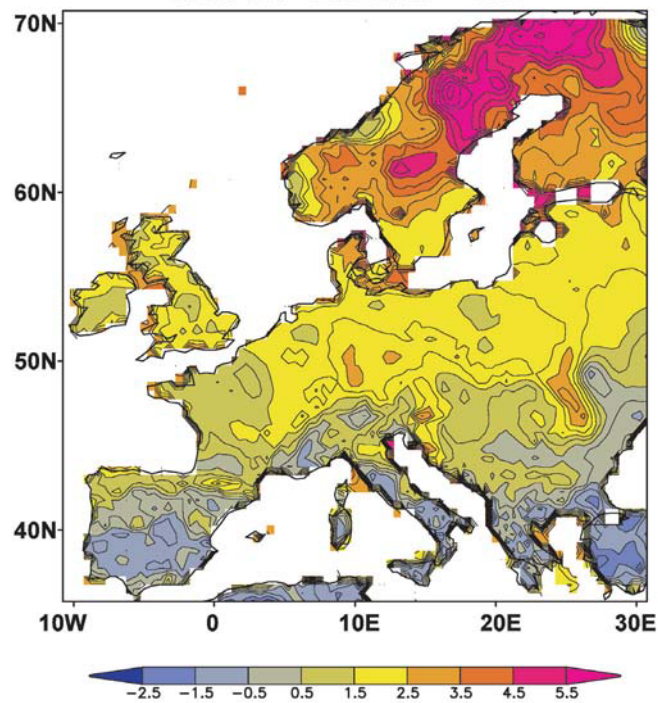
De auteurs danken Geert Lenderink (KNMI) voor gebruik van figuur 1 en Oscar Hartogensis (Wageningen Universiteit) voor het verzamelen van de CASES99-waarnemingen ten behoeve van figuur 2.

### Literatuur

- Beare, R.J., MacVean, M.K., Holtslag, A.A.M., Cuxart, J., Esau, I., Golaz, J.-C., Jimenez, M.A., Khairoutdinov, M., Kosovic, B., Lewellen, D., Lund, T.S., Lundquist, J.K., McCabe, A., Moene, A.F., Noh, Y., Raasch, S. and Sullivan, P.P.: 2005, An intercomparison of Large-Eddy Simulations of the stable boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology (accepted for GABLS special issue)*.
- Beljaars, A.C.M. and P.Viterbo, 1998: Role of the boundary layer in a numerical weather prediction model, in *Clear and Cloudy boundary layers*, A.A.M. Holtslag and P.G. Duynkerke Eds, Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, Amsterdam, 372pp.
- Cuxart, J., Holtslag, A.A.M., Beare, R.J., Bazile, E., Beljaars, A.C.M., Cheng, A., Conangla, L., Ek, M., Freedman, F., Hamdi, R., Kerstein, A., Kitagawa, H., Lenderink, G., Lewellen, D., Mailhot, J., Mauritsen, T., Perov, V., Schayes, G., Steeneveld, G.J., Svensson, G., Taylor, P.A., Weng, W., Wunsch, S., and Xu, K.-M., 2005: A single-column model intercomparison for a stably stratified atmospheric boundary layer, *Boundary-Layer Meteorology (conditionally accepted for GABLS special issue)*.
- Holtslag, A.A.M., 2003: GABLS initiates intercomparison for stable boundary layer case, *GEWEX news*, **13** (2), 7-8.
- King, J.C., W.M., Connolley and S.H. Derbyshire, 2001: Sensitivity of modelled Antarctic climate to surface and boundary layer flux parametrizations. *Q.J.Roy.Meteorol. Soc.*, **127**, 779-794.
- Kosovic, B. and J.A. Curry, 2000: A Large Eddy Simulation study of a quasi-steady, stably stratified atmospheric boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **57**, 1052-1068.
- Lenderink, G., B.J.J.M. van den Hurk, E. Van Meijgaard, A. van Ulden, and H. Cuijpers, 2003: *Simulation of present-day climate in RACMO2: first results and model developments*, TR-252, KNMI, De Bilt.
- Nieuwstadt, F.T.M., 1984: The Structure of the Stable, Nocturnal Boundary Layer, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 2202-2216.
- Svensson, G. and A.A.M. Holtslag, 2005: Impact of turbulence in the stable boundary layer on the synoptic scale flow, submitted to *Boundary-Layer Meteorology (under review for GABLS special issue)*.
- Viterbo, P.A., Beljaars, J.F. Mahfouf and J. Teixeira, 1999: The representation of soil moisture freezing and its impact on the stable boundary layer, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **125**, 2401-2426.
- Wiel, B.J.H. van de, R.J. Ronda, A.F. Moene, H.A.R. de Bruin and A.A.M. Holtslag, 2002: Intermittent turbulence and oscillations in the stable boundary layer over land. Part I: A bulk model, *J. Atmos. Sci.*, **59**, 942-958.

URL1: <http://www.met.wau.nl/gabls.html>

URL2: <http://www.gewex.org>



Het verschil in de 2-meter temperatuur tussen het RACMO2 model en waarnemingen voor een klimaatintegratie van 30 jaar voor het winterseizoen (met dank aan Geert Lenderink) (figuur 1 van artikel Holtslag e.a.)