

De turbulente atmosfeer

Bert Holtslag (Wageningen Universiteit)

Op 18 januari 2007 sprak ik mijn intreedende uit als Hoogleraar Meteorologie aan Wageningen Universiteit. Het werd een bijzondere dag met turbulent weer. Het KNMI had voor deze dag een weeralarm afgegeven en voor het eerst werd ook een verkeersalarm afgekondigd door Rijkswaterstaat. Bijgaand een verkorte en bewerkte weergave van de uitgesproken tekst.

De meteorologie is de wetenschap van het weer en het atmosferische klimaat. De oorspronkelijke betekenis van meteorologie komt van 'Meteorologica' (niet toevallig de naam van dit blad), en dat betekent 'spreken over de dingen in de lucht' (van Dale). Vandaag wil ik enkele actuele onderwerpen en ontwikkelingen in de meteorologie bespreken. Natuurlijk komt daarbij ook de invulling van het vakgebied bij deze universiteit aan de orde.

Wanneer de atmosfeer onregelmatig en wervelend in beweging is noemen we dat een turbulente beweging. Boven het aardoppervlak is de atmosfeer bijna altijd turbulent vanwege wrijving van de wind en opwarming door de zon. Ook de bewegingen in een cumulus of een onweerswolk zijn turbulent. Kenmerkend bij turbulente verschijnselen is de wervelende beweging in drie dimensies op afstanden van millimeters tot kilometers.

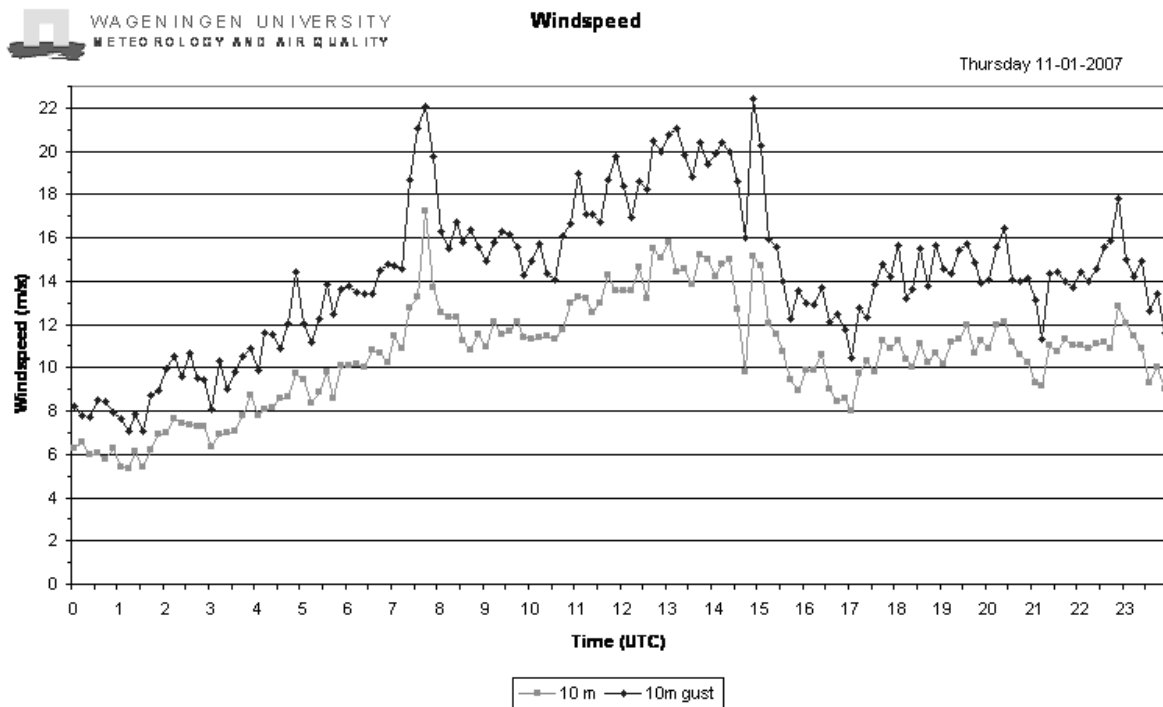
Vaak worden de bewegingen van de atmosfeer op grote schaal ook turbulent genoemd, zoals bij orkanen en depressies met afmetingen van honderden tot duizenden kilometers. Bij deze atmosferische verschijnselen komen de grootste turbulente wervels voor in het horizontale vlak en daarom heet dit ook wel twee-dimensionale turbulentie. Op een satellietfoto van een depressie lijkt de kenmerkende krul daarbij ook veel op een turbulente wervel.

Als een concreet voorbeeld van een turbulente atmosfeer wil ik graag met u terug naar vorige week donderdag 11 januari 2007. Ook toen was het een onstuimige dag met veel wind veroorzaakt door de passage van een koufront, waarbij ook slagregens, hagel en onweer voorkwamen. Vanwege de dreigende overlast en het gevaar gaf het KNMI ook voor deze dag een weeralarm uit.

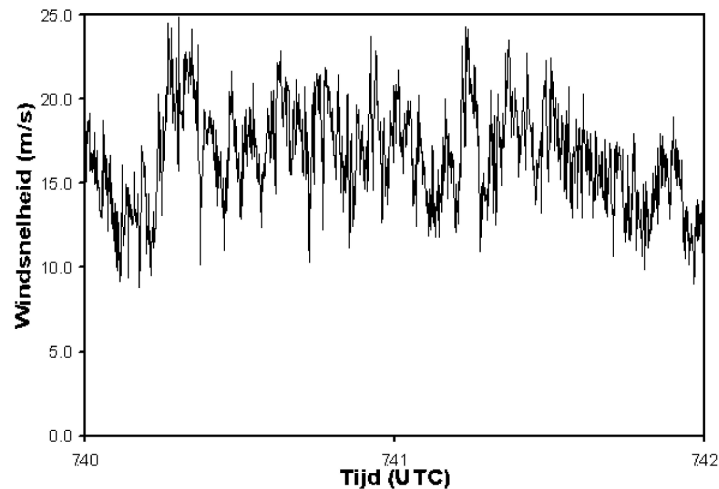
Figuur 1 toont de windsnelheden voor donderdag 11 januari 2007, zoals gemeten op het meteorologische waarnemingsstation aan de Haarweg te Wageningen. Er treden twee piekwaarden op, namelijk in de ochtend en in de vroege middag met waarden van 22 meter per seconde ofwel ongeveer 80 km per uur gedurende korte tijd. Dat is hard genoeg om het verkeer te ontregelen en schade aan natuur en bebouwing te geven.

Met speciale meetapparatuur kunnen we ook de hele snelle turbulente fluctuaties in de lucht meten. Helaas werd deze apparatuur in de middag door de storm en de regen aangetast, maar van de ochtendpiek zijn de metingen gelukkig wel beschikbaar. Figuur 2 laat de turbulente windmetingen zien op 3 meter hoogte gedurende 2 minuten voor de ochtendpiek. Opvallend zijn de grote variaties in de luchtbeweging op deze zeer korte tijdschalen. De fluctuaties worden veroorzaakt door drie-dimensionale, turbulente wervels die maar kort leven. Deze fluctuaties zijn chaotisch en niet voorspelbaar.

Helaas bestaat er geen algemene theorie waarmee turbulentie in een stroming kan worden beschreven en in detail kan worden voorspeld. Dit is feitelijk nog een onopgelost probleem uit de klassieke Natuurkunde.



Figuur 1. De gemeten windsnelheden op donderdag 11 januari 2007 op het meteorologisch waarnemingsstation aan de Haarweg te Wageningen. De metingen geven op 10 meter hoogte de gemiddelde windsnelheden (onderste lijn) en de windstoten (bovenste lijn).



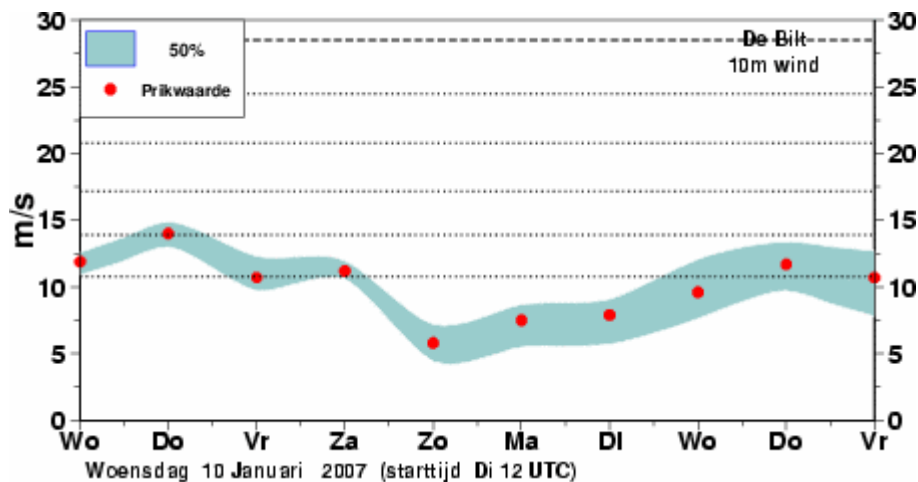
Figuur 2. De turbulente windsnelheid gemeten op een hoogte van 3 meter op donderdag 11 januari 2007 op het meteorologisch waarnemingsstation aan de Haarweg te Wageningen van 8.40 tot 8.42 uur (wintertijd). Met dank aan Bert Heusinkveld en Adrie Jacobs.

Het turbulente weer

In tegenstelling tot de chaotische turbulentie boven het aardoppervlak, is het weerbeeld wel degelijk voorspelbaar tot een zekere termijn vooruit. Als voorbeeld ziet u in figuur 3 de verwachte windsnelheid voor de periode van 10 tot 19 januari 2007, berekend op basis van de waarnemingen van dinsdag 9 januari 2007. De verwachting geldt voor Midden-Nederland in een ruime straal rondom De Bilt.

Naast een zogenaamde 'prikwaarde' voor de gemiddelde windsnelheid op het middaguur van elke dag, wordt ook een onzekerheidsband getoond in figuur 3. Hoe smaller de band,

hoe meer betrouwbaar de verwachting geacht wordt te zijn. Voor donderdag 11 januari komt de prikwaarde zeer goed overeen met de waargenomen gemiddelde windsnelheid van 14 meter per seconde rond het middaguur in Wageningen.



Figuur 3. De verwachte windsnelheid voor de periode van woensdag 10 tot en met vrijdag 19 januari 2007 voor De Bilt, berekend op basis van de waarnemingen van dinsdag 9 januari 2007. Met dank aan KNMI (www.knmi.nl) en ECMWF.

Figuur 3 geeft ook een verwachting voor de gemiddelde windsnelheid van vandaag. Dus in de weersverwachting die vorige week woensdag werd uitgegeven, was al duidelijk dat het vandaag hard zou kunnen gaan waaien na een relatief rustige periode in het begin van deze week. De opgetreden wind vandaag is aanmerkelijk hoger (vandaar opnieuw een weeralarm) en deze werd al sinds het begin van deze week goed voorzien!

Helaas komt de weersverwachting niet altijd zo mooi uit en blijft het maken van een weersverwachting een grote uitdaging. Meteorologen steken daarbij elke dag hun nek uit en staan daarmee in principe elke dag bloot aan kritiek. Dit geldt zeker als het weer tegenvalt of als er onverwacht extremeiteiten optreden. Om de kwaliteit en de bruikbaarheid van de weersverwachting te kunnen beoordelen is het nodig om achteraf de weeruitspraken op een eerlijke manier te vergelijken met het werkelijk opgetreden weer. Door die verificatie is het ook mogelijk om inzicht te krijgen waar en hoe verwachtingen fout gaan en waar modellen en bijbehorende verwachtingsmethoden verbetering nodig hebben. De grote weercentra, zoals het Europese weercentrum, publiceren dan ook regelmatig over de kwaliteit van de modelverwachtingen.



Figuur 4. Omslag van het weekblad HP/De Tijd van 5 januari 2007.

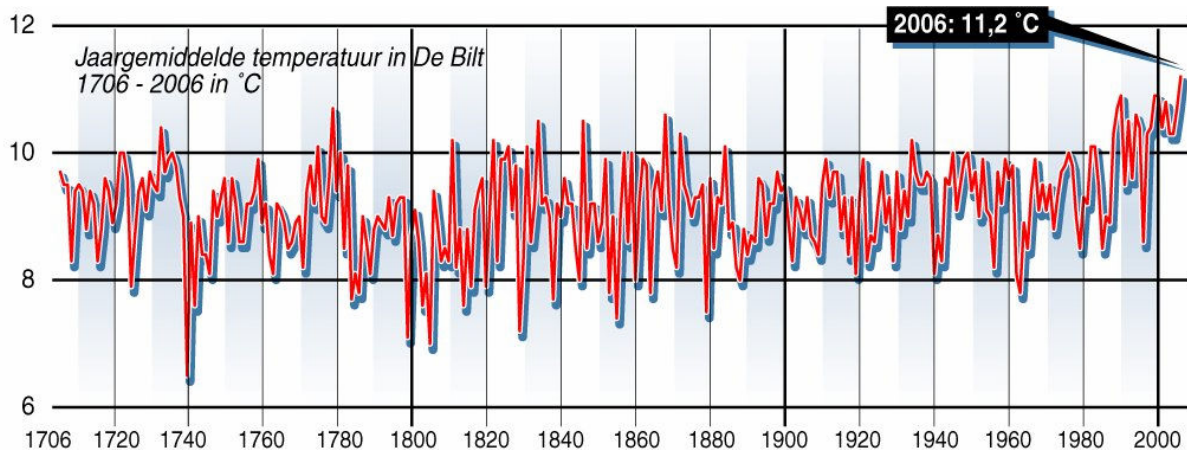
In Nederland zijn naast het KNMI een aantal commerciële weerbedrijven actief. Ook zijn er vele weervrouwen en weermannen die uitspraken doen over het weer in de media. Over de kwaliteit van al die weeruitspraken is niet zo veel bekend. Bovendien blijken de weerbedrijven nogal verschillende opvattingen te hebben over hoe je weersverwachtingen moet bewerken en moet communiceren naar de gebruiker.

Onlangs nam het opinieweekblad HP/De Tijd het initiatief om in samenwerking met mijn leerstoelgroep, de verwachtingen van de verschillende weerbedrijven te vergelijken met het opgetreden weer (figuur 4). Het initiatief gaf aanleiding tot enige beroering in weerland en helaas waren niet alle bedrijven bereid om mee te werken aan een vergelijkend warenonderzoek. Dat is een gemiste kans in een tijd waarin van alles en nog wat de maat wordt genomen. In dit verband wil ik graag aanbevelen dat het KNMI, als publieke instelling, het initiatief zou nemen en de kwaliteit van haar weersverwachtingen meer actief en toegankelijk zou publiceren!

Het turbulente klimaat

Naast het weer en de weersverwachting, trekt de opwarming van het klimaat veel aandacht. In 2006 was het in Nederland uitzonderlijk warm, namelijk het warmste jaar en de warmste herfst sinds het begin van de metingen in Nederland. Figuur 5 laat de tijdserie zien van de jaargemiddelde temperatuur in De Bilt gedurende de laatste 300 jaar. De tijdserie ziet er grillig uit en heeft veel weg van een turbulent signaal.

Figuur 5 toont ook de opwarming van de laatste 20 jaren en de verwachting is dat die trend voorlopig doorzet vanwege de toename van broeikasgassen in de atmosfeer en mogelijk door andere invloeden van de mens (IPCC, 2001 en 2007). Maar wat betekent een warmer klimaat voor het weer van de toekomst? Hoe worden de extremen in het weer beïnvloed? Er is een enorme behoefte aan antwoorden op dit soort vragen en dit krijgt terecht veel aandacht binnen de meteorologie en verwante wetenschappen.



Figuur 5. Jaargemiddelde temperatuur in De Bilt gedurende de laatste 300 jaar. Met dank aan ANP en KNMI.

Daarnaast is het ook van belang om aandacht te blijven schenken aan de schommelingen in het atmosferische klimaat. Hoe hangen die schommelingen bijvoorbeeld samen met de grilligheid van de atmosfeer in wisselwerking met de oceaan en het landoppervlak? Is het daarbij toeval dat de wind in onze streken de laatste jaren opvallend vaak uit het zuiden en zuidwesten waait of is dit ook een direct gevolg van de opwarming van de aarde? Daar is helaas nog weinig over bekend.

Gestimuleerd door de vooruitgang van de kwaliteit in de weersverwachting, worden er de laatste jaren steeds meer pogingen gedaan om verwachtingen te maken van het weerbeeld op een termijn van maanden en zelfs langer vooruit. Dat kan alleen zinvol op basis van

kansverwachtingen voor het *gemiddelde* weer over een aantal maanden of seizoen, bijvoorbeeld "de kans is groot dat we hier een droger en warmer dan gemiddeld voorjaar of zomer krijgen". Succesvolle seizoensverwachtingen hebben vanzelfsprekend een grote relevantie voor de maatschappij, zoals de energievoorziening en de beschikbaarheid van water voor natuur en landbouw.

Turbulent onderzoek

Het meteorologische onderzoek bij de leerstoelgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit richt zich voor een belangrijk deel op het beter begrijpen en beschrijven van atmosferische turbulentie en aan andere kleinschalige atmosferische verschijnselen boven land. Daarvan wil ik nu graag een aantal voorbeelden geven.

Ook zonder wind kan turbulentie aanwezig zijn in de atmosfeer, bijvoorbeeld wanneer de zon het aardoppervlak heeft opgewarmd en thermiek ontstaat. Boven een warme asfaltweg of boven kale grond is de lucht dan aan het 'trillen'. Deze zogenaamde 'scintillaties' zijn ook met het blote oog waarneembaar. Soms zie je die scintillaties zelfs boven een ijsoppervlak, zolang het oppervlak maar warmer is dan de lucht.

De luchttrillingen in de atmosfeer boven een warm oppervlak, worden veroorzaakt doordat luchtpakketjes van verschillende grootte en met verschillende temperatuur en vochtinhoud chaotisch door elkaar bewegen. Hierdoor ontstaan variaties in de brekingsindex van de lucht en dit blijkt een goede maat te zijn voor het transport van warmte en van waterdamp. Met een zogenaamde 'scintillometer' kunnen de luchttrillingen gemeten worden, gemiddeld over een zekere afstand of padlengte. Hiermee kan indirect een bepaling plaatsvinden van de uitwisseling van warmte en waterdamp tussen het aardoppervlak en de atmosfeer. In de praktijk kunnen daarbij afstanden worden gebruikt variërend van 100 m tot 10 km (de Bruin, 2002).

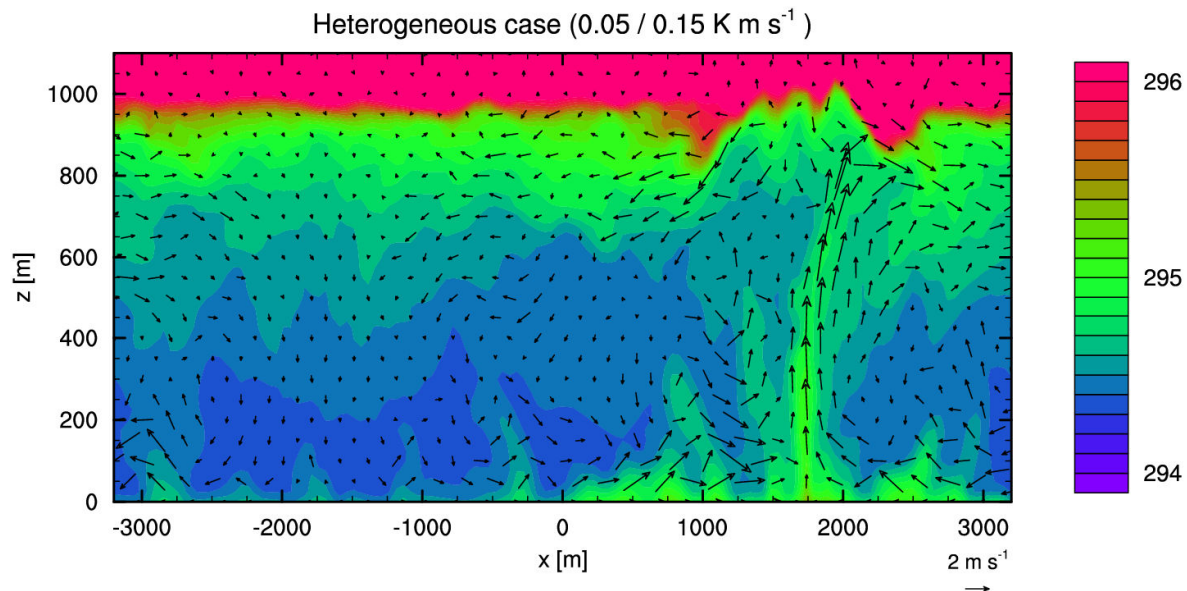
Er is een toenemende behoefte aan betrouwbare metingen van de hoeveelheid warmte en waterdamp die het aardoppervlak afstaat aan de luchtlagen erboven. Normaal worden deze gegevens echter niet gemeten op meteorologische stations. Met behulp van scintillometrie kan worden bepaald hoeveel water er verdampt in een bepaald gebied. Dat is direct van belang voor de waterbalans en de aanvulling van water door irrigatie in de droge gebieden op aarde. Ook zijn metingen met behulp van scintillometrie waardevol bij onafhankelijke validatie van atmosfermodellen en voor de toetsing van berekeningsmethoden van verdamping met behulp van satellietobservaties (de Bruin, 2002).

In de laatste jaren is op vele plaatsen in de wereld onderzoek gedaan naar de toepasbaarheid van scintillometers. Mede op basis van het werk bij de leerstoelgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit is de scintillometer in productie genomen door een Nederlands bedrijf. Ook in de toekomst willen we binnen de leerstoelgroep werken aan de verdere ontwikkeling en toepassing van scintillometrie voor onderzoek en diverse toepassingen.

De turbulente grenslaag

De onderste laag van de atmosfeer waarin turbulentie door wind en thermiek aanwezig is, wordt de atmosferische grenslaag genoemd. Boven de grenslaag heeft de stroming in de atmosfeer een veel meer regelmatig karakter (afgezien van de turbulente bewegingen in wolken). De dikte van de grenslaag kan boven land enorm variëren in ruimte en tijd, van een paar meter in de nacht tot enkele kilometers overdag. Vaak treedt in de grenslaag vorming van mist en wolken op. Via metingen kunnen we veel leren over atmosferische turbulentie. Een andere mogelijkheid om meer te weten te komen over het gedrag van turbulentie is door middel van numerieke simulatie. Hiermee kan de turbulente stroming voor een belangrijk deel in drie dimensies worden uitgerekend.

Ter illustratie geeft figuur 6 een impressie van de thermiek in de atmosfeer die in de middag kan ontstaan boven een heterogeen en warm landoppervlak, wanneer de horizontale windsnelheid klein is (van Heerwaarden, 2006). De top van de grenslaag zit hier net onder het donkere gebied op ongeveer 1000 meter. In de linkerhelft van figuur 6 wordt de atmosfeer door een grasoppervlak opgewarmd (met een voelbare warmtestroom van 60 W/m^2) en vindt er verdamping van water plaats vanaf het oppervlak. In de rechterhelft van de figuur bevindt zich een droog landoppervlak zonder vegetatie en zonder verdamping. In dit geval is de uitwisseling van warmte boven het droge oppervlak drie maal zo groot als boven het grasoppervlak (dus 180 W/m^2).



Figuur 6. Thermiek in de grenslaag boven heterogeen land. De grijs tinten in de figuur zijn een maat voor de zogenaamde potentiële temperatuur in Kelvin (zie schaalverdeling aan rechterzijde). Met dank aan Chiel van Heerwaarden, Jordi Vila en Kees van den Dries.

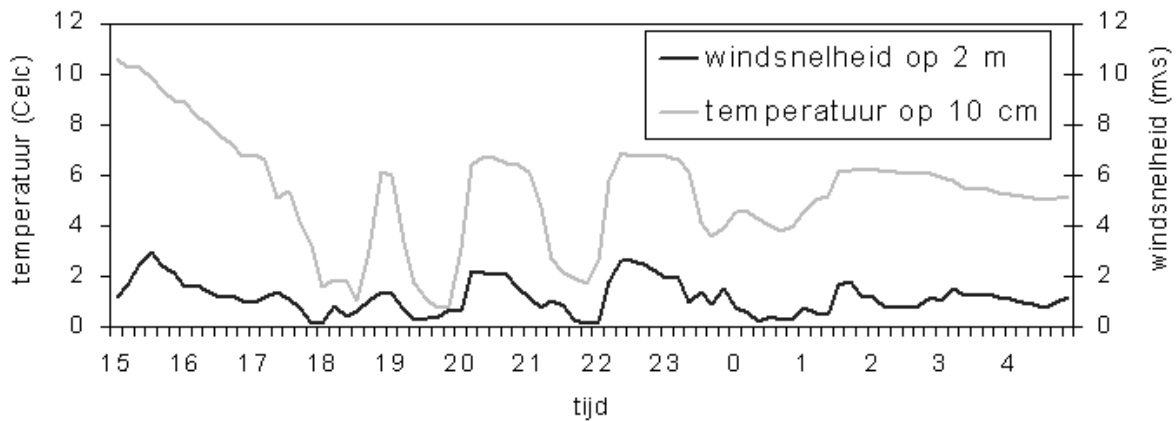
In het midden van het (warme en droge) rechtergedeelte van figuur 6 zijn thermiekbellen zichtbaar. Via thermiek vindt zeer efficiënt uitwisseling en menging plaats van warmte, waterdamp, impuls en eventuele verontreinigingen vanaf het aardoppervlak naar de atmosfeer. Vanwege de grote stijgende bewegingen in de thermiekbel, zal eventuele wolkvorming eerder plaatsvinden boven het warme en droge oppervlak dan boven het grasoppervlak (Ek and Holtslag, 2004). In de leerstoelgroep wordt door verschillende promovendi en stafleden onderzoek verricht naar verschijnselen in de grenslaag overdag boven land in wisselwerking met het landoppervlak (Vilà-Guerau de Arellano et al, 2004; Moene et al, 2006).

De stabiele grenslaag

In de nacht en ochtend kunnen turbulente bewegingen in de atmosferische grenslaag bijna afwezig zijn. Dit is het geval wanneer de afkoeling van het oppervlak groot is. Deze is het sterkst bij onbewolkt weer en lage windsnelheid. Warme lucht zit dan boven koude lucht en dat is een stabiele situatie. In deze omstandigheden kunnen bij het oppervlak hoge concentraties van eventuele verontreinigingen in de atmosfeer ontstaan, bijvoorbeeld doordat uitlaatgassen van auto's niet worden weggemengd. Ook treedt in dit soort omstandigheden dauw- of rijpvorming op en blijven eventueel gevormde mistflarden bij het oppervlak hangen. Bij voldoende afkoeling kan ook nachtvorst ontstaan.

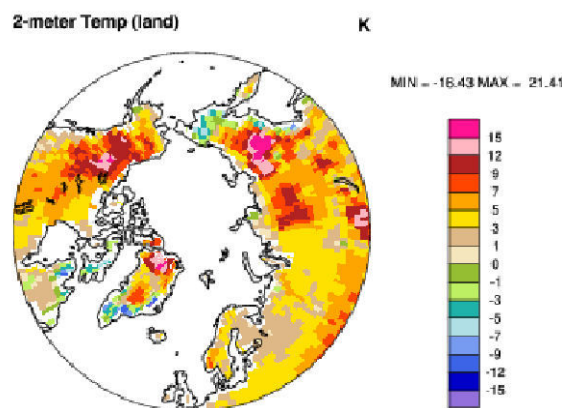
Interessant is dat bij een lage windsnelheid, de turbulente koppeling tussen de atmosfeer en het landoppervlak geheel kan wegvallen en zich enige tijd later kan herstellen. Dit gedrag leidt dan tot oscillaties in de temperatuur en de windsnelheid. Als er weinig turbulentie is,

wordt de temperatuur relatief laag en bij veel turbulentie, is de temperatuur relatief hoog. Figuur 7 toont waarnemingen hiervan op het weerstation aan de Haarweg te Wageningen in de nacht van 15 op 16 november 2002. Ook op andere locaties in Nederland werd dit gedrag in die nacht waargenomen. Het getoonde gedrag kan grotendeels worden verklaard met een relatief simpel conceptueel model dat door een van de promovendi van de leerstoelgroep ontwikkeld is (van de Wiel et al, 2002).



Figuur 7. Oscillaties in temperatuur en wind gemeten op het weerstation aan de Haarweg te Wageningen in de avond van 15 en nacht van 16 november 2002. Met dank aan Gert-Jan Steeneveld en Bas van de Wiel.

Om kleinschalige processen in de atmosferische grenslaag beter te begrijpen en te representeren in regionale en mondiale atmosfeermodellen, wordt internationaal samengewerkt binnen de 'GEWEX-Atmospheric Boundary Layer Study (GABLS)'. Hieraan wordt vanuit de leerstoelgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit actief geparticipeerd en leiding gegeven (Holtslag, 2006). Hierbij worden modellen vergeleken met waarnemingen en numerieke simulaties. Het blijkt dat de representatie van de stabiele grenslaag in atmosfeermodellen erg onvolledig is, vaak niet in overeenstemming is met waarnemingen en ook erg gevoelig is voor bepaalde modelparameters (Steeneveld et al, 2006).



Figuur 8. Het gemiddelde verschil voor de temperatuur op 2 meter hoogte tussen berekeningen met het NCAR klimaatmodel en de waarnemingen voor het huidige winterklimaat op het Noordelijk halfrond. Met dank aan NCAR en Gunilla Svensson (Stockholm Universiteit).

Figuur 8 laat een voorbeeld zien van hoe groot het probleem kan zijn in een klimaatmodel. De figuur toont het gemiddelde verschil voor de temperatuur op 2 meter hoogte tussen de berekeningen met het model en de waarnemingen voor het huidige winterklimaat op het Noordelijk halfrond. Verschillen van meer dan 10 graden treden op tussen het model en de

waarnemingen. Het is duidelijk dat hieraan nog veel moet gebeuren en daaraan willen we vanuit de leerstoelgroep bijdragen.

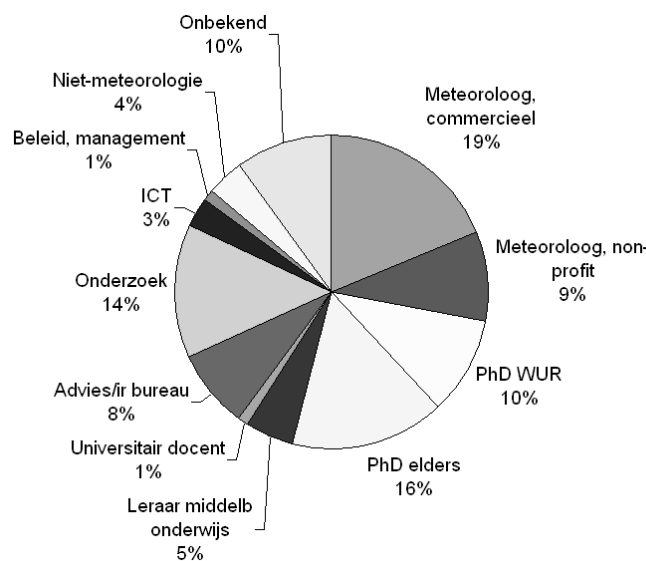
Samenvatting van het onderzoek

In de leerstoelgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit willen we door middel van waarnemingen, numerieke simulaties en conceptuele modellen, de kennis van de atmosferische grenslaag boven land uitbreiden, uitdragen en toepassen. De bedoeling is tevens om de verworven kennis hanteerbaar te maken voor verbetering van de details in atmosfeermodellen en te gebruiken voor studies van het weer, het klimaat en de luchtkwaliteit. Daarnaast besteden we aandacht aan de validatie van modellen met metingen van onszelf en anderen. Ook in de toekomst blijft dit onderzoek van belang, zeker in turbulent weer en klimaat!

Het meteorologisch onderwijs in Wageningen

Voordat ik afsluit wil ik graag iets zeggen over het onderwijs in de meteorologie. Dit wordt al lange tijd in Wageningen gegeven, zij het onder zeer verschillende namen. In het meteorologische onderwijs komt een breed scala van onderwerpen aan bod, niet alleen met betrekking tot de atmosferische grenslaag boven land, maar ook de meteorologie van grootschalige atmosferische bewegingen, wolkenfysica en andere onderwerpen.

Sinds 1994 kan er bij deze universiteit ook in de meteorologie worden afgestudeerd, namelijk eerst als onderdeel van de studie 'Bodem, Water en Atmosfeer (BWA)' en de laatste jaren zelfstandig binnen de Master (MSc) opleiding 'Meteorologie en Luchtkwaliteit'. Over deze periode zijn er 99 mensen afgestudeerd in de Meteorologie. Gemiddeld studeren er dus zo'n 7 a 8 mensen per jaar af in de meteorologie en daarmee vervullen we een belangrijke maatschappelijke rol.



Figuur 9. Overzicht van eerste werkkring van Wageningse Meteorologen in de periode 1994 tot en met 2006 (n=99). Met dank aan Leo Kroon.

Figuur 9 laat zien waar de Wageningse meteorologen sinds 1994 hun eerste baan vinden. Het grootste deel blijkt binnen het onderzoek te gaan werken of als operationeel meteoroloog bij het KNMI of een van de commerciële weerbedrijven. Het perspectief op de arbeidsmarkt voor afgestudeerde meteorologen is door de jaren heen goed geweest en dat lijkt ook in de toekomst zo te blijven.

Naast de uitstroom van afstudeerders, zijn er gemiddeld ook twee academische promoties per jaar vanuit de meteorologie. Op dit moment zijn er bijna 20 mensen bezig met de voorbereiding van een proefschrift in de meteorologie of een verwant onderwerp in samenwerking met andere groepen binnen en buiten Wageningen.

Dankwoord

Op 1 mei 1999 werd ik aangesteld als hoogleraar en leerstoelhouder in de Meteorologie en Luchtkwaliteit aan deze universiteit. Vanaf het begin was het duidelijk dat dit een erg breed terrein is voor een enkele leerstoel. Het verheugt me dan ook zeer dat met de komst van Maarten Krol als hoogleraar Luchtkwaliteit (Krol, 2007), ik me weer in hoofdzaak op de Meteorologie kan richten. In mijn loopbaan heb ik met vele mensen samengewerkt, binnen en buiten mijn vakgebied. Van 1977 tot 1999 was ik werkzaam bij het KNMI, vanaf 1993 tot 1999 ook als hoogleraar in deeltijd bij de Universiteit Utrecht (Holtslag, 1996) en sinds 1999 ben ik dus voltijds hoogleraar bij Wageningen Universiteit. Dat is een grote eer en een groot genoegen, temeer omdat ik bij deze universiteit ben gepromoveerd. Zonder alle namen te noemen, wil ik graag alle betrokken collega's danken voor de inspiratie, aanmoediging en samenwerking op de diverse gebieden en bij de vele projecten. In het bijzonder wil ik de medewerkers van de leerstoelgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit bedanken voor hun inspanningen en prettige werksfeer, alsmede mijn vrouw Monique en mijn zonen Joost en Wouter voor hun betrokkenheid bij mij en mijn werk!

Literatuur

- Bruin, H.A.R. de (red.), 2002: Speciale uitgave van *Boundary Layer Meteorology* over 'Scintillometry', volume 105.
- Dale van,,: Het groot woordenboek van de Nederlandse taal.
- Ek, M.B., and Holtslag, A.A.M., 2004: Influence of soil moisture on boundary layer cloud Development. *J. Hydrometeorology*, 5, 86-99.
- Heerwaarden, C. van, 2006: The influence of land surface heterogeneities on the entrainment of heat, MSc thesis leerstoelgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit (onder begeleiding van J. Vila).
- Holtslag, A.A.M., 1996: Altijd weer! Oratie als hoogleraar Meteorologie aan de Universiteit Utrecht, 11 september 1996.
- Holtslag, A.A.M., 2006: Speciale uitgave van *Boundary Layer Meteorology* met resultaten van de 'GEWEX Atmospheric Boundary-layer Study (GABLS) on Stable Boundary Layers', 118.
- IPCC 2001 en 2007: Climate Change, The Scientific Basis.
- Krol, M.C., 2007: Fijn stof tot nadenken. Oratie als hoogleraar Luchtkwaliteit en Atmosferische Chemie aan Wageningen Universiteit, 18 januari 2007.
- Moene, A.F.; Michels, B.I.; Holtslag, A.A.M., 2006: Scaling Variances of Scalars in a Convective Boundary Layer Under Different Entrainment Regimes. *Boundary-Layer Meteorology*, 120, 257-274.
- Steenefeld, G.J.; Wiel, B.J.H. van de; Holtslag, A.A.M., 2006: Modeling the Evolution of the Atmospheric Boundary Layer Coupled to the Land Surface for Three Contrasting Nights in CASES-99. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 63, 920-935.
- Vilà-Guerau de Arellano, J.; Gioli, B.; Miglietta, F.; Jonker, H.J.J.; Klein Baltink, H.; Hutjes, R.W.A.; Holtslag, A.A.M., 2004: Entrainment process of carbon dioxide in the atmospheric boundary layer. *Journal of Geophysical Research*, 109, D18110.
- Wiel, B.J.H. van de; Moene, A.F.; Ronda, R.J.; DeBruin, H.A.R.; Holtslag, A.A.M., 2002: Intermittent turbulence and oscillations in the stable boundary layer over land. Part II: A system dynamics approach. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59, 2567-2581.