

Progressie in het begrijpen van ons weer en klimaat: het Buys-Ballot najaarssymposium 2007

GERT-JAN STEENEVELD³, ALEXANDER BAKKER¹, JANNEKE ETTEMA², RIANNE GIESEN², ALWIN HAKLANDER^{5,1}, CHIEL VAN HEERWAARDEN³, YVONNE HINSSEN², FEMKE DE JONG⁴, ROBERT LEANDER¹, THOMAS REERINK² EN ADRIAAN ZUIDERWEG².
(1: KNMI, 2: IMAU, 3: WAGENINGEN UNIV., 4: NIOZ, 5: TUE)

De recente constatering dat ons klimaat in hoog tempo verandert is aanleiding geweest voor een explosie aan klimaatonderzoek. Nieuwe kennis roept nieuwe vragen op, en dus blijft er nog van alles te onderzoeken. Zelfs in het jongste IPCC rapport blijven de onzekerheden op veel gebieden groot. De Buys-Ballot onderzoeksschool (met het IMAU, Wageningen Universiteit, KNMI, NIOZ, en het Max Planck Instituut als leden) is het overkoepelend orgaan op het gebied van klimaatonderzoek in Nederland, waarin jonge onderzoekers worden opgeleid en begeleid. Op 1 en 2 november 2007 verzamelden onderzoekers die zijn aangesloten bij de Buys-Ballot onderzoeksschool zich in Dalfsen om op een enthousiaste manier verslag te doen van hun jongste klimaatonderzoek. Hier volgt een aantal korte samenvattingen van onderzoek waar op dit moment aan gewerkt wordt.

Massabalans van de Groenlandse ijskap

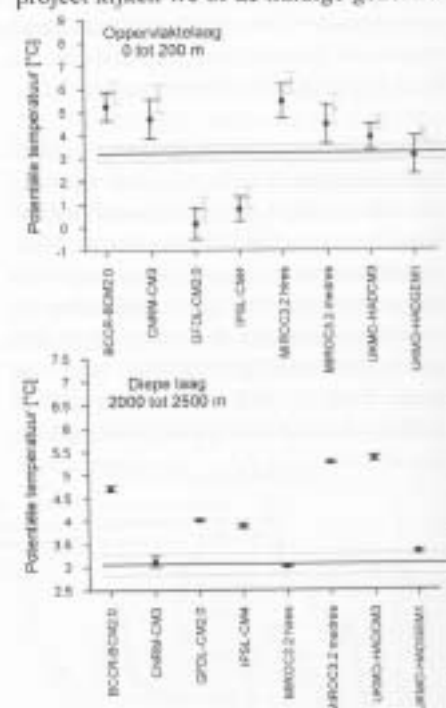
JANNEKE ETTEMA (IMAU), MICHEL VAN DEN BROEKE (IMAU), ERIK VAN MEDGAARD (KNMI)

Wereldwijd stijgt de gemiddelde temperatuur, maar het is niet eenduidig wat

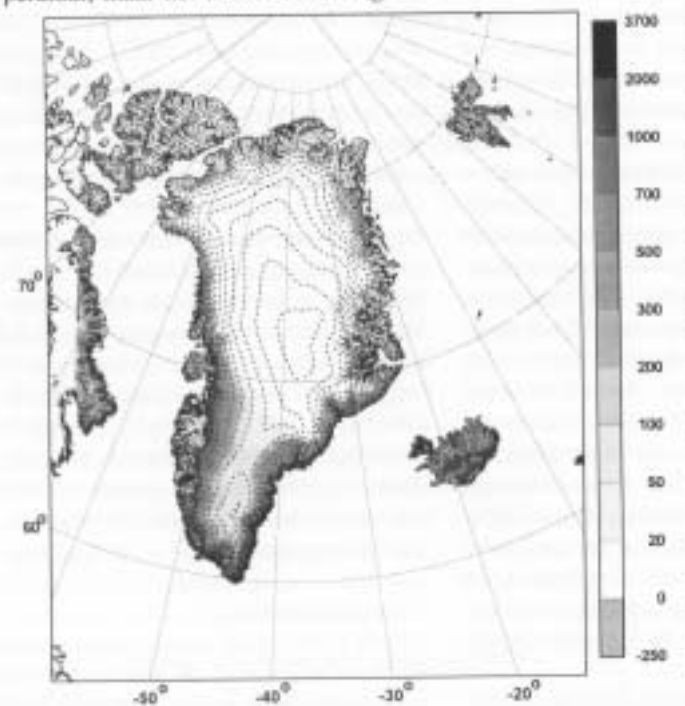
ben we de parameterisatie van het ijs-sneeuw pakket verbeterd. Penetratie en het herbevrozen van smeltwater in de sneeuw is zeer belangrijk voor de warmtehuishouding van de sneeuw en dus voor de massabalans. Smelt vindt plaats in een 20-100 km smalle zone langs de randen

van de ijskap waar de gradienten in klimaat en topografie groot zijn. De horizontale resolutie van RACMO is op 11 km gezet om zodoende deze gebieden goed te simuleren in het model. Dit levert veel detail op in bijvoorbeeld de hoeveelheid smelt gedurende 1 jaar, zie figuur 1. De meeste smelt (circa 3,5 m water equivalent) treedt op langs de westkust. Deze modelresultaten komen goed overeen met metingen gedaan door het IMAU in dit gebied. Door met RACMO2.1 naar

de Groenland, is een belangrijke schakel in de thermohaliene circulatie. In dit gebied wordt het oppervlaktewater dat vanaf de evenaar naar de noordwestelijke Noord-Atlantische Oceaan is getransporteerd afgekoeld tot koud diep water dat terugstroomt naar het zuiden. De hydrografie van dit gebied is goed beschreven, sinds 1938 worden er bijna elk jaar metingen gedaan van onder andere zoutgehalte en temperatuur. In dit project kijken we of de huidige generatie



Figuur 2. Resultaten voor de vergelijking van de modeltemperatuur en waargenomen temperatuur in de Labrador Zee. De zwarte punten geven het modelgemiddelde over alle seizoenen, de grijze punten over de zomer. De foutenbalken, één standaard deviatie boven en onder het gemiddelde, geven een maat voor de variabiliteit van de modellen. De zwarte horizontale lijn is de gemiddelde waargenomen temperatuur, de grijze lijnen liggen één standaard deviatie boven en onder dit gemiddelde.



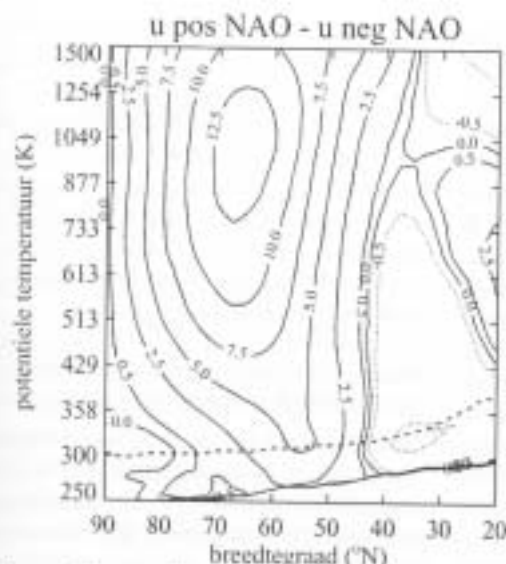
Figuur 1. Hoeveelheid smelt gedurende 1 jaar in mm waterequivalent voor de Groenlandse ijskap berekend met het regionaal atmosferisch klimaatmodel RACMO2.1 op 11 km resolutie.

de gevolgen zijn voor de Groenlandse ijskap en dus voor de zeespiegel. Een hogere luchttemperatuur zorgt voor meer afsmelting, maar ook voor aanvoer van vochtiger lucht, dus voor meer neerslag op de ijskap. Om antwoord te krijgen op de vraag welk proces dominant is in de massabalans, de winterneerslag of de zomersmelt, gebruiken we een regionaal atmosferisch klimaatmodel (RACMO2.1). Voor ons onderzoek heb-

de afgelopen 50 jaar te kijken, krijgen we hopelijk een gedetailleerd beeld van de ruimtelijke en tijdsvariatie van het huidige klimaat en de massabalans van de Groenlandse ijskap.

Een regionale vergelijking van de huidige generatie gekoppelde klimaatmodellen met observaties

FEMKE DE JONG (NIOZ).
De Labrador Zee, tussen Newfoundland



Figuur 3. Het verschil in gemiddelde zonale wind tussen januari maanden met een negatieve gemiddelde NAO index en die met een positieve gemiddelde NAO index (in m/s), als functie van de breedtegraad en de potentiële temperatuur (1500K ~ 40 km). De doorgetrokken lijn onderin geeft het oppervlak aan en de gestreepte lijn de tropopauze.

mondiale gekoppelde atmosfeer- en ocea-anmodellen, gebruikt voor het vierde IPCC-rapport, in staat zijn om de oceanografische toestand van de Labrador Zee te simuleren. Dit doen we door de modelresultaten van pre-industriële simulaties (dus zonder klimaatverandering) te vergelijken met de observaties.

Zoals figuur 2 laat zien wijkt een aantal modellen significant af van de gemeten toestand. Twee van de modellen hebben een extreem koude en zoete oppervlaktelaag, wat het gevolg kan zijn van te grote zoetwaterfluxen aan het oppervlak of een niet adequate mengingsparametrisatie. In de diepere lagen simuleren een aantal modellen te warme en zoute watermassa's. Ook de andere eigenschappen die horen bij de formatie van diep water uit oppervlakte water, zoals een lage stabiliteit en relatief grote jaarlijkse variabiliteit, laten veel van de modellen niet zien. Verder onderzoek moet duidelijkheid geven of de oorzaak van deze verschillen in het oceaamodel zelf of in de koppeling met het atmosfeermodel gezocht moet worden.

Heeft de stratosfeer invloed op de winden aan het oppervlak?

YVONNE HINSSSEN (IMAU)

De januari temperatuur in De Bilt is de laatste 50 jaar met ongeveer 2°C toegenomen. Dit is meer dan de globaal gemiddelde temperatuuroptoe name. Dit wijst erop dat niet alleen een toename van broeikasgasconcentraties, maar mogelijk ook circulatieveranderingen een rol spelen. De Noord-Atlantische Oscillatie (NAO) bepaalt voor een groot deel de

variabiliteit in het Nederlandse winterklimaat. De sterkte van de NAO wordt gegeven door de NAO-index, het drukverschil tussen IJsland en de Azoren. Een positieve NAO-index komt overeen met een hogere frequentie van milde westenwinden over West-Europa. Een verandering van de temperatuur zou dus kunnen samenhangen met een verandering in de NAO. De vraag is dan wat een verandering in de NAO kan veroorzaken. Speelt de hoger gelegen stratosfeer (~10-50 km) hierbij een rol? Mogelijk kan een verandering van ozon- of broeikasgasconcentraties in de stratosfeer een lokale verandering in potentiële vorticititeit (PV, een maat voor de circulatie en stabiliteit van een luchtpakketje) veroorzaken, wat weer kan

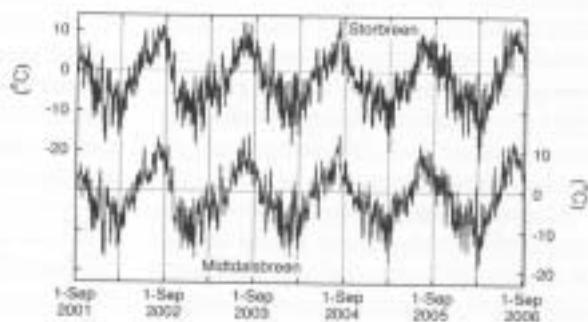
leiden tot globale veranderingen in de wind. Door de gemiddelde zonale wind gedurende de januari maanden met een negatieve NAO-index af te trekken van die met een positieve NAO-index (zie figuur 3), wordt duidelijk dat de verschillen zich niet tot de troposfeer beperken. Hetzelfde kan gedaan worden voor de PV, wat ook verschillen tot ongeveer 40 km hoogte laat zien. Door middel van een inversiemethode, waarbij het windveld uit het PV-veld wordt afgeleid, kan nu bekeken worden wat het effect van alleen de stratosferische PV op de winden in de troposfeer is. Deze invloed blijkt aan het oppervlak klein te zijn, maar er is wel enige invloed op de wind bovenin de troposfeer. Dit beïnvloedt dan het ontstaan van cyclonen, waardoor indirect ook de wind aan het oppervlak zou kunnen veranderen.

Meteorologische metingen op twee gletsjers in Zuid-Noorwegen

RIANNE GIESEN¹, LISS ANDREASSEN², MICHEL VAN DEN BROEKE¹ EN HANS OERLEMANS¹ (¹IMAU, ²NVE (NORWEGIAN WATER RESOURCES AND ENERGY DIRECTORATE), OSLO, NOORWEGEN)

Aan het oppervlak van gletsjers wordt voortdurend energie en massa uitgewisseld met de atmosfeer. Hierdoor reageren gletsjers sterk op schommelingen in het klimaat. Om de reactie van een gletsjer op klimaatverandering te kunnen model-

leren, is het belangrijk een beeld te hebben van het micro-klimaat op de gletsjer. Dit bepaalt namelijk de grootte van de energiefuxen aan het oppervlak, zoals netto kortgolvlige straling en turbulente fluxen. We hebben twee 5-jaar lange meteorologische datasets vergeleken, gemeten door twee identieke automatische weerstations op twee gletsjers in Zuid-Noorwegen. De gletsjers, Storbreen en Midtdalsbreen, liggen 120 km van elkaar. Daggemiddelde luchttemperatuur op de twee locaties is sterk gecorreleerd (zie figuur 4). Het windklimaat is echter heel verschillend, op Midtdalsbreen zijn windsnelheden gemiddeld een factor 1.8 groter dan op Storbreen. De oorzaak is het open landschap rond Midtdalsbreen. Storbreen wordt omsloten door bergen. Door de hogere windsnelheden zijn de turbulente fluxen bijna twee keer zo groot op Midtdalsbreen. Ook de nettostraling is groter op Midtdalsbreen, vanwege de minder frequente en minder dikke bewolking dan op Storbreen. Op Storbreen levert nettostraling gemiddeld 76% van de energie die wordt gebruikt



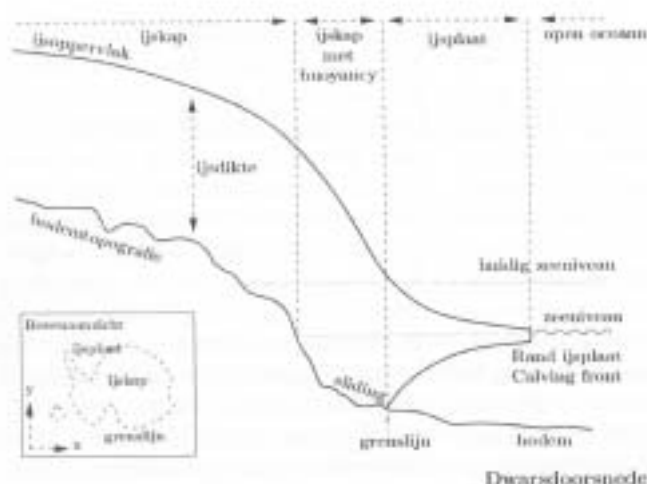
Figuur 4. Daggemiddelde luchttemperatuur op de gletsjers Storbreen en Midtdalsbreen.

voor het smelten van sneeuw en ijs, op Midtdalsbreen is dit 66%. De bodemwarmtestroom onttrekt 2% van de energie op beide locaties, de overige energie wordt geleverd door de turbulente fluxen.

Ijsskapedynamica op lange tijdschaal

THOMAS REERINK EN RODERIK VAN DE WAL (IMAU)

De mate waarin de aarde bedekt is met grote ijsskappen, beïnvloedt het klimaat. Daartoe is het begrijpen van het ontstaan en het verloop van de ijstijdencyclus met behulp van een gedegen drie-dimensionaal ijsstromingsmodel nodig. Zo'n ijsdynamisch model moet uiteenlopende situaties de baas kunnen gedurende zo'n lange periode, zoals situaties met grote ijsskappen of juist zonder ijsskappen, snel groeiend en verdwijnend. Aan de rand van de ijsskap kan zich een drijvende ijsplaat vormen en deze kan, indien hij



Figuur 5. Dwar doorsnede van een ijskap, overgaand in een drijvende ijsplaat in de kustzone.

nog wat in dikte toeneemt, tot de zeebodem doorgroeien. Via dit mechanisme kan een ijskap gemakkelijker zeewaarts groeien (zie figuur 5). Andersom kan de terugtrekking van een ijskap worden veroorzaakt door een stijgende zeespiegel waardoor de ijskap gaat drijven en afbreekt. Door de wrijving aan de bodem is het spanningsveld in de ijskap heel anders dan in een drijvende ijsplaat. Die spanning, afhankelijk van de lokale ijstemperatuur, bepaalt in het ijs de vorming en daarmee de stroming van het ijs. Het verschil in spanning in de ijskap en de ijsplaat heeft tot gevolg gehad dat in bestaande ijsmodellen heel verschillende snelheidsvergelijkingen worden opgelost. Dit heeft tot gevolg dat de ijskap en de ijsplaat op een bewegende grenslijn gekoppeld moeten worden, wat numeriek lastige randvoorwaarden schept. In dit project hebben we een set van snelheidsvergelijkingen afgeleid die voor zowel ijskap als ijsplaat geldt, zodat we niet langer met een intern bewegende grenslijn van randvoorwaarden te maken hebben. Als bijproduct levert dit voor het eerst een echte drie-dimensionale ijsplaatbeschrijving op.

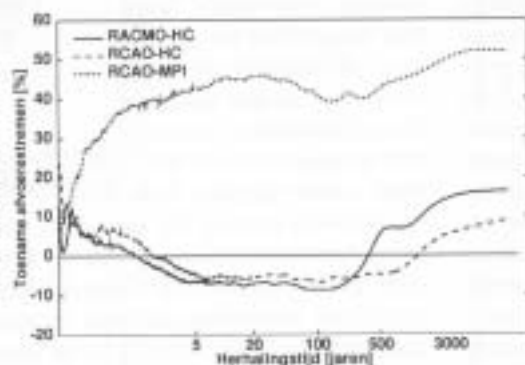
Extreme rivierafvoeren in een gewijzigd klimaat

ROBERT LEANDER EN ADRI BUISSHAND (KNMI)

Vanuit het Nederlandse waterbeheer is de interesse in de gevolgen van klimaatverandering vooral gericht op de statistiek van extreme gebeurtenissen. Ons onderzoek richt zich op de verandering van extreme rivierafvoeren van de Maas in het winterhalfjaar met herhalings tijden in de orde van 1000 jaar. Uitgangspunt is de uitvoer van regionale klimaatmodellen (RCMs) aangedreven door globale circulatiemodellen (GCMs). Met het oog op de lange herhalings tijden zijn voor

deelstroomgebieden dagreeksen van 9000 jaar neerslag en temperatuur gegenereerd met dezelfde ruimtelijke en temporele samenhang als de 30-jarige dagreeksen uit de modelruns met behulp van de "Nearest-neighbour resampling". Dit is gedaan voor zowel de modeldata uit de controle simulatie als die uit een simulatie voor het SRES A2-scenario. De lange reeksen

zijn doorgerekend met een hydrologisch model voor de Maas. Voor twee RCM-GCM combinaties veranderen de afvoerextremen nauwelijks (figuur 6), doordat de toename van de gemiddelde neerslag in de winter gepaard gaat met een afname van de meerdaagse variabiliteit, terwijl bij een andere RCM-GCM combinatie de extremen zelfs meer toenemen dan het gemiddelde. Dit verschil wordt voornamelijk door het drijvende GCM veroorzaakt. Voor een realistisch beeld van de onzekerheid in de toekomstige afvoerextremen is een ensemble van RCM simulaties, aangedreven door verschillende GCMs aan te bevelen.

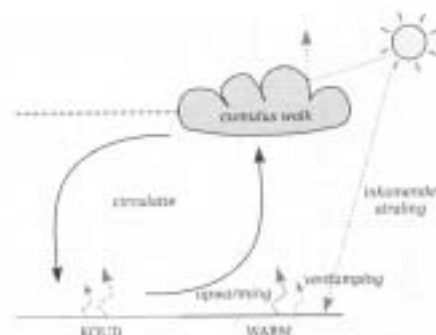


Figuur 6. Relatieve verandering van afvoerextremen als functie van de herhalings tijd voor drie verschillende RCM-GCM combinaties.

Wolkenvorming boven heterogene landschappen

CHIEL VAN HEERWAARDEN (WAGENINGEN UNIVERSITEIT)

De aanwezigheid van kleinschalige heterogeniteiten (minder dan 20 km) in het landschap kan voor circulaties zorgen die niet worden opgelost door weermodellen. Er zijn aanwijzingen dat deze circulaties, ondanks hun beperkte ruimtelijke schaal, wolkenvorming kunnen beïnvloeden. Satellietwaarnemingen van delen van het Amazonegebied laten zien dat op



Figuur 7. Schematische weergave van wolkenvorming boven heterogene landschappen.

plaatsen waar een patroon van beboste en ontboste gebieden aanwezig is, er structureel meer wolken zijn dan boven homogeen bebost gebied. Dit fenomeen is nader onderzocht met een turbulentie-model (large eddy simulation model). In dit driedimensionale model is het landoppervlak in twee delen gesplitst: een deel met een lage verdamping en een hoge voelbare warmteflux (het warme gebied), en een deel met een hoge verdamping en een lage voelbare warmteflux (het koude gebied). Dit systeem is op een tijdschaal van enkele uren onderzocht, waarbij er gekeken is naar het transport van warmte en vocht. Om de wolkenfysica voorlopig te vermijden zijn de begincondities zo gekozen dat er geen verzadiging in de atmosfeer optreedt. Het blijkt dat er een circulatie ontstaat waarbij de wind aan het landoppervlak

van het koude naar het warme gebied stroomt (figuur 7). Vervolgens stijgt hier de lucht op, om daarna aan de grenslaagtop terug te stromen naar het koude gebied. Deze circulatie heeft een aantal essentiële gevolgen voor wolkenvorming. De wind transporteert turbulente wervels die veel vocht bevatten van het koude gebied naar het warme gebied, waar deze samenkomen met de relatief droge, maar veel sterkere turbulente wervels van het warme gebied. We hebben dus sterke turbulentie en veel

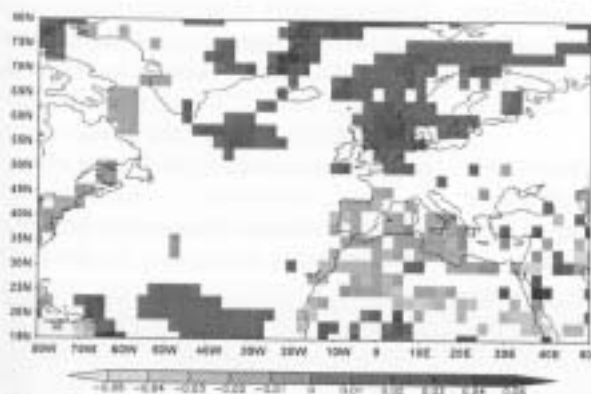
vocht op dezelfde locatie, die gezamenlijk opstijgen naar de grenslaagtop. Dit lijkt een ideale situatie voor wolkenvorming. Aan de top van de grenslaag kan de relatieve vochtigheid tien procent hoger zijn dan boven een homogeen landschap met dezelfde gebiedsgemiddelde fluxen.

Gevolgen van klimaatverandering voor windenergie

ALEXANDER BAKKER (KNMI)

De planning van nieuwe windparken vereist een nauwkeurige inschatting van het

toekomstige windklimaat. De afgelopen jaren leek er in Noordwest Europa sprake van een daling van de jaarlijkse energieopbrengst ten opzichte van het langjarige gemiddelde. Het is de vraag of hier sprake is van een trend die zal doorzetten of dat dit is toe te schrijven aan toevallige variaties. Een mogelijk dalende trend is slechts relevant voor schattingen van toekomstige opbrengsten, als deze trend zowel in de tijd als in de ruimte consistent is. De maandelijkse relatieve windopbrengst voor Nederland (Windex) wordt echter pas sinds 1988 systematisch bijgehouden aangezien dat het moment is van de start van de moderne windturbine-ontwikkeling. Voor een langere termijn is daarom een voorspellende grootheid nodig. In de praktijk blijkt de Windex (een relatieve maat voor de opbrengst van windturbines op maandbasis) zeer goed te correleren met de maandgemiddelde geostrofische windsnelheid ($R=0.95$). Uit luchtdrukvlakken van de ERA40 re-analyse database zijn zeer goede schattingen te maken van de maandgemiddelde geostrofische windsnelheid voor de periode van 1958 t/m 2001 (figuur 8). Voor deze periode blijkt er een positieve trend in



Figuur 8. Trend (1958-2001) in geostrofische windsnelheid (in $m s^{-1} jaar^{-1}$). Wit betekent geen significante trend.

de geostrofische wind voor Noordwest-Europa en een dalende trend voor Zuid-Europa. Dit ruimtelijke patroon wordt geassocieerd met een stijgende trend in de Noord-Atlantische Oscillatie (NAO) in de wintermaanden. Deze zelfde winter NAO kende een dalende trend voor de periode 1988 t/m 2006, wat consistent is met dalende trend in windenergieopbrengsten. De richting van de trend in de NAO is dus zeer gevoelig voor de onderzochte periode. Wanneer gekeken wordt naar een nog veel langere periode 1928-2006 wordt geen trend waargenomen. Wat betreft schattingen voor toekomstige windopbrengsten is het dan ook niet logisch om uit te gaan van eventuele trends en kan het best eenvoud-

digweg gebruik gemaakt worden van het langjarig gemiddelde.

Variabiliteit van de meridionale circulatie in de stratosfeer

ALWIN HAKLANDER (TUE EN KNMI)

Gedurende de noordelijke wintermaanden is in de stratosfeer een meridionale circulatie aanwezig die ozonrijke lucht vanaf de evenaar naar de Noordpool transporteert, waar de lucht daalt en adiabatisch opwarmt. Deze zogeheten Brewer-Dobson circulatie (BDC) wordt hoofdzakelijk gedreven door brekende planetaire (Rossby)golven: grootschalige zonale asymmetrieën in bijvoorbeeld de temperatuur en de wind. In de stratosfeer worden de golven instabiel, waarna ze breken en een westwaartse volumekracht op de stroning uitoefenen. De sterkte van de BDC wordt bepaald door de opwaartse component van de 'Eliassen-Palm' flux in de lage stratosfeer, die recht evenredig is met de poolwaartse warmteflux die de golven induceren. Hierin

worden grote jaar-op-jaar variaties waargenomen, die nog niet goed begrepen worden. Met behulp van de ERA-40 dataset van het ECMWF hebben we de poolwaartse warmteflux onderin de stratosfeer ontleed in de diverse zonale golfcomponenten, waaruit bleek dat de variabiliteit in de BDC wordt gedomineerd door een stationaire golf die één breedtecirkel in z'n geheel omspant (golfgetal 1, figuur 9).

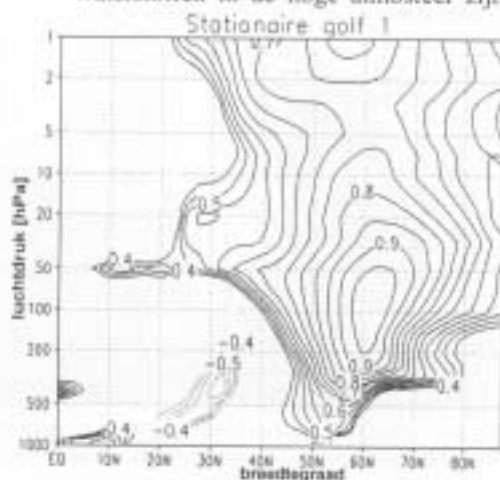
Deze golf vindt zijn oorsprong in de troposfeer, waarbij het vermogen om de stratosfeer te bereiken (en de BDC aan te drijven) afhangt van of hij zich ten noorden of ten zuiden van ongeveer $40^{\circ}N$ in de troposfeer opwaarts voortplant.

Ontwikkelingen in niet-methaan koolwaterstof isotopenonderzoek bij IMAU

ADRIAAN ZUIDERWEG, RUPERT HOLZINGER EN THOMAS RÖCKMANN (IMAU)

Atmosferische koolwaterstof sporengassen vormen een belangrijk onderdeel van de globale koolstofbalans en zijn 'chemical precursors' van ozon- en NO_x -vorming. Lichte, niet-methaan koolwaterstoffen zoals ethaan komen vrij door verbruik van fossiele brandstoffen en bij

het transport en het verbranden van biomassa, inclusief bosbranden. De exacte bronnen, verspreidingsdynamiek en de verwijderingsprocessen van deze koolwaterstoffen in de hoge atmosfeer zijn



Figuur 9. Correlatiecoëfficiënt van de poolwaartse warmteflux door stationair golfgetal 1 op 100 hPa (ongeveer 16 km hoogte), gemiddeld over $40-80^{\circ}N$, met de poolwaartse warmteflux door stationair golfgetal 1 op andere drukniveaus en breedten. De waarden zijn berekend op basis van januari-februari gemiddelden over de periode 1979-2002. Alleen de statistisch significante waarden zijn hier getoond.

echter nog niet goed bekend. Om inzicht te krijgen in deze processen wordt isotopenonderzoek uitgevoerd, waarbij naar de stabiele isotopenverhouding van koolstof wordt gekeken. Een verandering in de verhouding van koolwaterstoffen kan door, onder andere, oxidatie met OH-plaatsvinden. Omdat de snelheid van deze reactie bekend is, is de verhouding zelf een indicatie van de emissieleeftijd in een monster. De isotopenverhouding van koolwaterstoffen zal worden gemeten in luchtmonsters op 10 km hoogte tijdens het CARIBIC project, (geïnstumenteed lijnvlucht met een luchtmonsterplatform). Hiermee kunnen dan, in combinatie met de modellering van de circulatie van sporengassen, de bronnen, verspreiding en verwijdering in de hogere lagen van de atmosfeer worden onderzocht. Dit is het uiteindelijke doel van ons werk. Om deze metingen te kunnen doen is een combinatie van een gaschromatografie en een isotopenmassaspectrometrie instrument ontworpen en gebouwd. De eerste testen van dit instrument met verscheidende monsters geven aan dat het systeem tot tevredenheid functioneert, met name dat de metingen van isotopenverhouding van ethaan met 0,1% herhaalbaar zijn. De eerste metingen van CARIBIC monsters zullen binnen enkele maanden plaatsvinden nadat het systeem verder ingesteld is.