

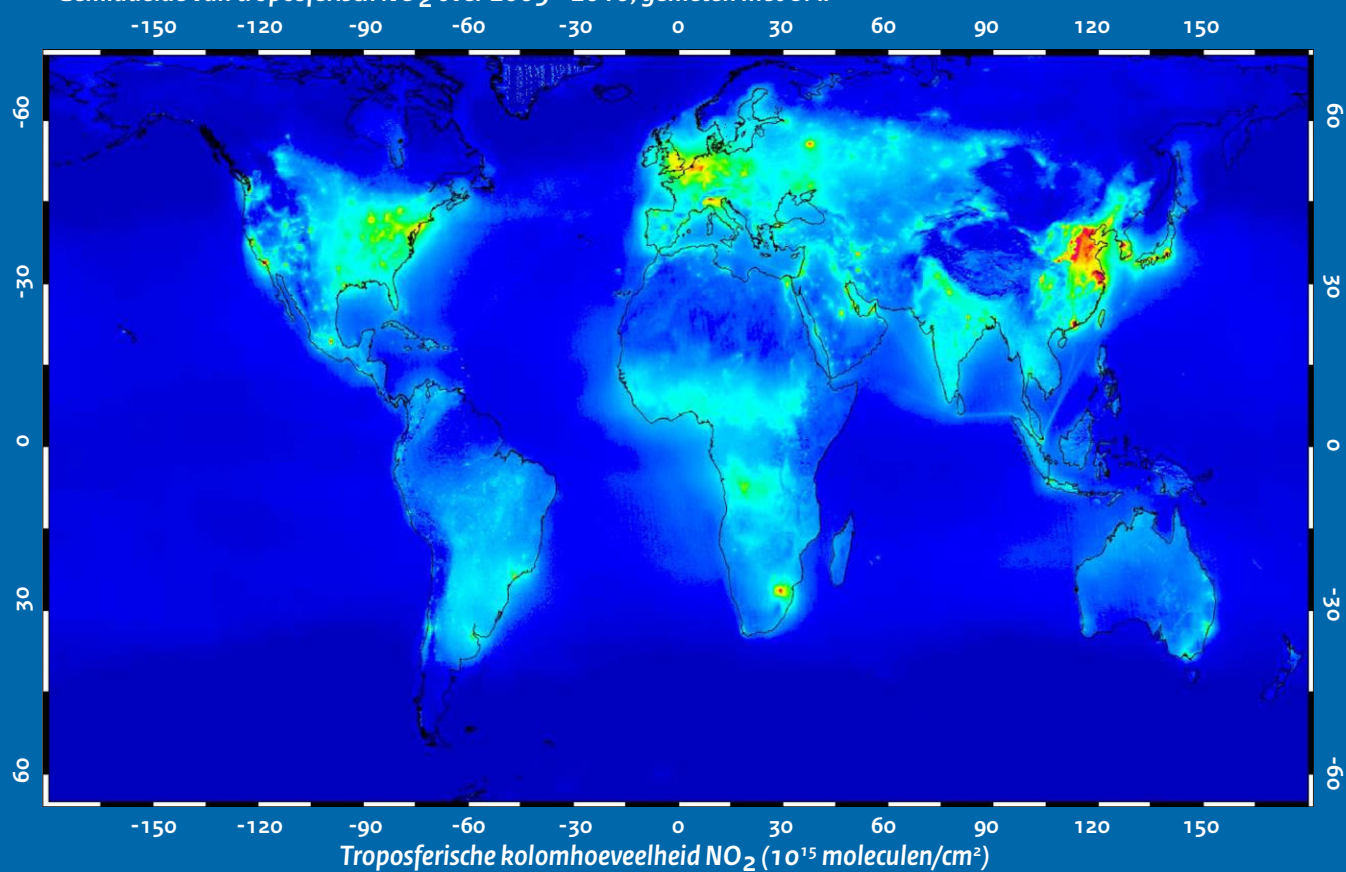


Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Kijk op Klimaat

Resultaten van satellietmetingen

Gemiddelde van troposferisch NO₂ over 2005 - 2010, gemeten met OMI



Mondiale verdeling van stikstofdioxide (NO₂) in de troposfeer, gebaseerd op de OMI satellietmetingen over de periode 2005 - 2010. Hoge concentraties NO₂ worden weergegeven met geel-rode kleuren, lage concentraties met blauw-groene kleuren, zie ook pagina 7.

Doel brochure [5](#)

Economische activiteit is zichtbaar in satellietmetingen van luchtkwaliteit [6](#)

Vinger aan de pols bij vulkaanuitbarstingen [8](#)

Satellietmetingen van zon en regen in Nederland [10](#)

Worden normen voor luchtvervuiling in de scheepvaart nageleefd? [12](#)

Kwaliteitscontrole met grondmetingen en weerballonnen [14](#)

Nauwkeurige neerslagbepalingen uit satellietdata [15](#)

Hoe is het nu eigenlijk gesteld met het ozongat? [16](#)

Afrika: testlaboratorium voor Nederlandse klimaatmodellen [18](#)

Colofon

Bijdragen: Folkert Boersma, Wouter Greuell, Jos de Laat, Piet Stammes, Tim Vlemmix, Michiel van Weele en Erwin Wolters.

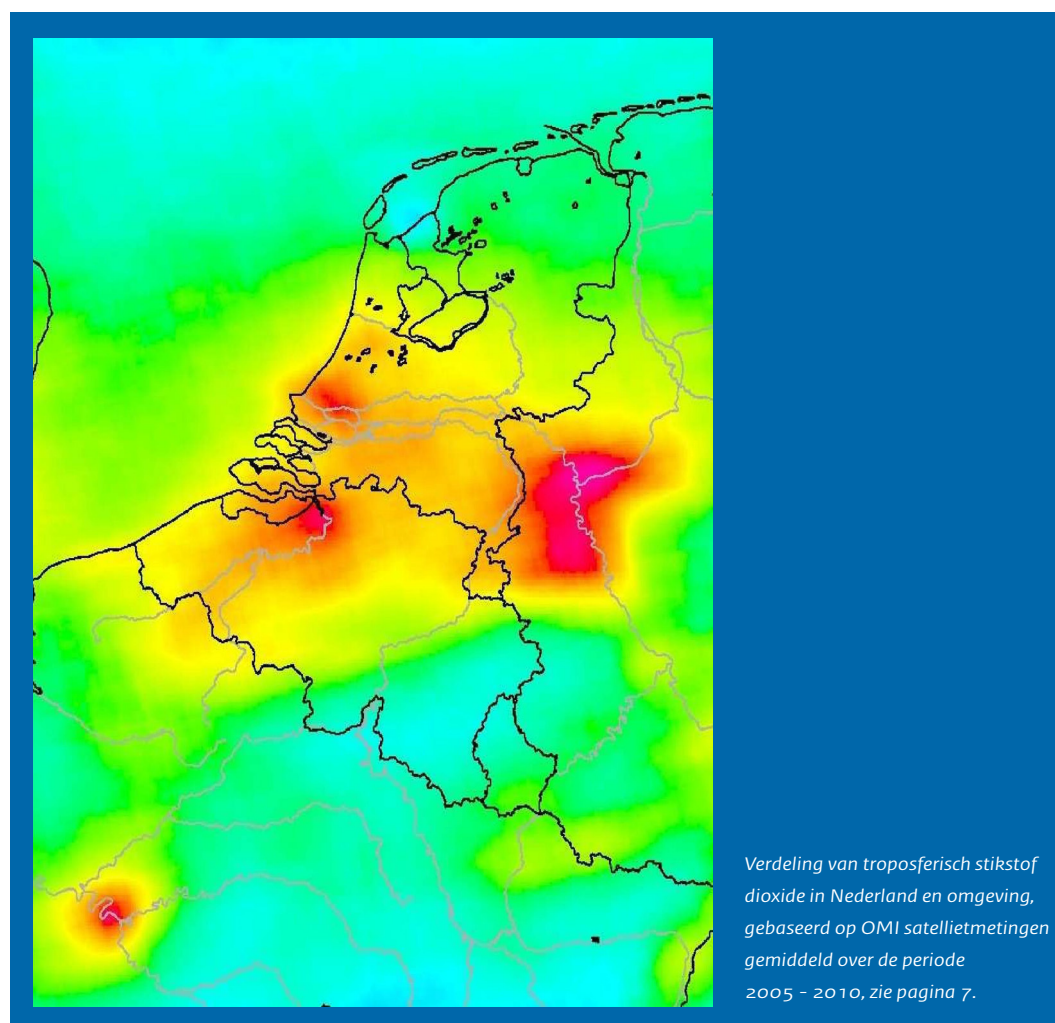
Foto's en figuren: AFP, ESA, EUMETSAT, NASA, Wikipedia Commons, Ronald van der A, Reinout Boers, Folkert Boersma, Patricia Castellanos, Wouter Greuell, Jos de Laat, Bram Maasakkers, Brent Maddux, Jan-Fokke Meirink, Erik van Meijgaard, Bas Mijling, René Noordhoek, Rob Roebeling, Piet Stammes, Olaf Tuinder, Geert Vinken, Tim Vlemmix, Ping Wang, Michiel van Weele, Erwin Wolters.

Alle rechten voorbehouden. Wij hebben getracht rechthebbenden op te sporen en toestemming te vragen, wat niet in alle gevallen gelukt is. Mocht u een foto herkennen waarvan u rechthebbende bent, gelieve dan contact op te nemen met het KNMI. Dit zal dan in een volgende editie rechtgezet worden.

Redactie: Maarten Snee, Folkert Boersma, Erwin Wolters.

Eindredactie: Piet Stammes, Reinout Boers.

Layout: Jaap Kwakkel.



Doel brochure

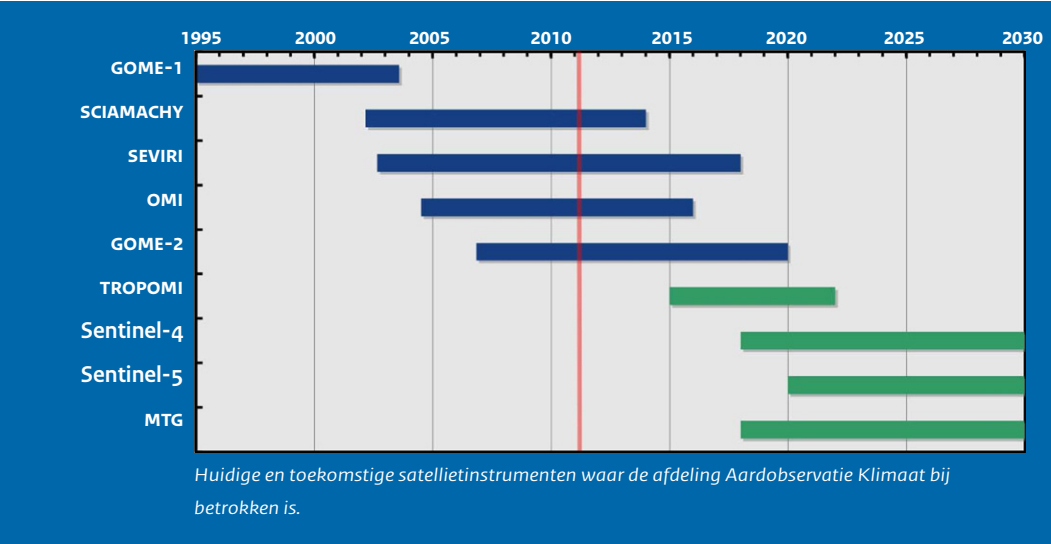
Klimaat staat in de schijnwerpers. Dat is geen wonder. Het klimaat heeft een grote impact op het dagelijks leven van de Nederlandse burgers. Voor de bescherming van Nederland, nu en in de toekomst, is kennis over klimaat en klimaatverandering essentieel. Wat is de huidige toestand? Wat is er waar van de voorspellingen? Satellietmetingen worden steeds belangrijker bij het beantwoorden van deze vragen. Alleen met satellieten kan de hele aarde worden waargenomen. Alleen metingen kunnen zekerheid geven over de huidige toestand van de atmosfeer, over de trends in de afgelopen jaren, en over de betrouwbaarheid van modellen.

In de afdeling Aardobservatie Klimaat van het KNMI houden wij ons bezig met monitoring van de aardatmosfeer vanuit de ruimte. Daarbij gaat het om de samenstelling van de atmosfeer, mondiaal en regionaal. Kernthema's zijn ozonlaag, luchtvervuiling, broeikasgassen, wolken en aerosolen. Voor de metingen gebruiken we onder andere de Neder-

landse satellietinstrumenten SCIAMACHY en OMI alsmede de Europese satellietinstrumenten SEVIRI en GOME-2. Deze brochure is bedoeld om een paar in het oog springende resultaten te laten zien van onze bijdragen aan satellietmonitoring van de atmosfeer in het jaar 2011.

Het werk van de afdeling Aardobservatie Klimaat wordt voor groot deel uitgevoerd in de vorm van projecten in opdracht van externe partijen. De grootste opdrachtgevers zijn het Ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM), de Netherlands Space Office (NSO), de Europese Organisatie voor de Exploitatie van Meteorologische Satellieten (EUMETSAT), de Europese Unie (EU), de European Space Agency (ESA), en de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO). We willen al onze opdrachtgevers en het directieteam van het KNMI bedanken voor het in ons gestelde vertrouwen in de afgelopen jaren.

Prof. dr. P.F. Levelt, hoofd afdeling Aardobservatie Klimaat, KNMI.



Satellietontvanger op het KNMI-gebouw in De Bilt.



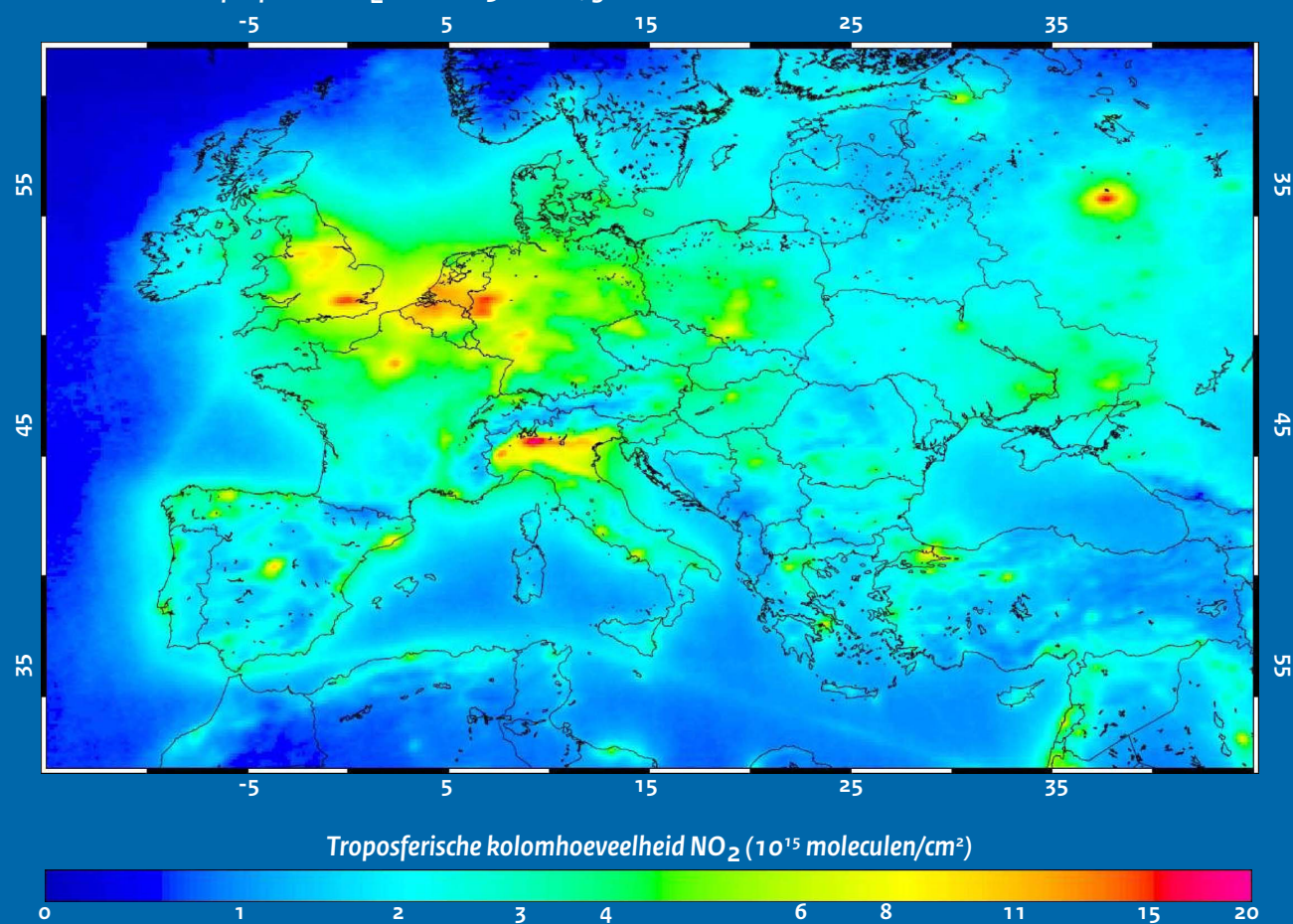
Economische activiteit is zichtbaar in satelliet-metingen van luchtkwaliteit

Veranderingen in economische activiteit leiden tot veranderingen in industriële activiteit zoals hier bij de Hoogovens (Ijmuiden). Dit heeft veranderingen in luchtvervuiling tot gevolg die meetbaar zijn met satellieten.

West-Europa is wereldwijd gezien één van de hotspots van luchtvervuiling door het grote aantal bewoners en de hier gevestigde industrie. Luchtvervuiling heeft grote invloed op de gezondheid

van mensen. Om de mate van luchtvervuiling – vaak luchtkwaliteit genoemd – te meten bestaan er in Europa netwerken van grondmeetinstrumenten. Sinds kort kunnen ook satellieten luchtvervuiling

Gemiddelde van troposferisch NO₂ over 2005 - 2010, gemeten met OMI



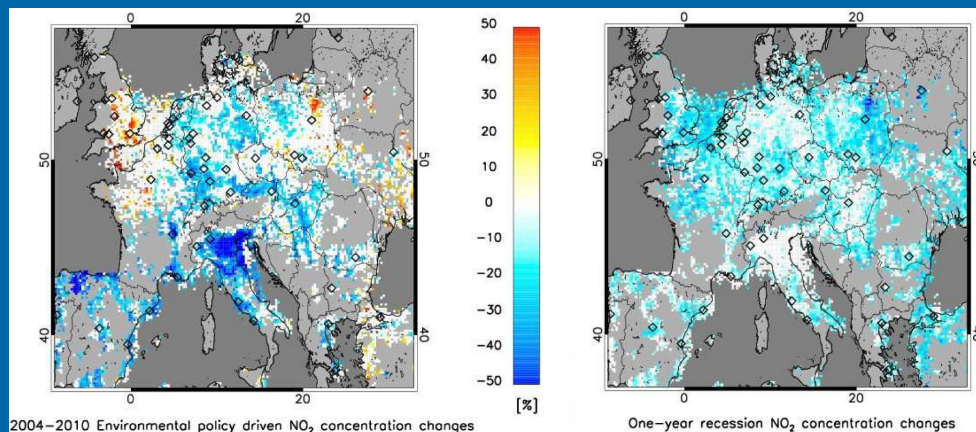
Figuur 1: Verdeling van troposferisch NO₂ boven Europa zoals waargenomen door OMI, gemiddeld over de periode 2005-2010. Rood betekent veel NO₂, blauw weinig NO₂.

meten. Het voordeel van satellieten is dat ze de hele aarde bestrijken, en dat de metingen een constante kwaliteit hebben. De satelliet meet niet de vervuiling op grondniveau, maar een gemiddelde over de onderste kilometers van de atmosfeer. Die onderste laag wordt de troposfeer genoemd. Satellieten meten belangrijke componenten van luchtvervuiling in de troposfeer, namelijk stikstofdioxide (NO_2), zwaveldioxide (SO_2), ozon (O_3), ammoniak (NH_3), koolmonoxide (CO) en fijnstof (aërosolen).

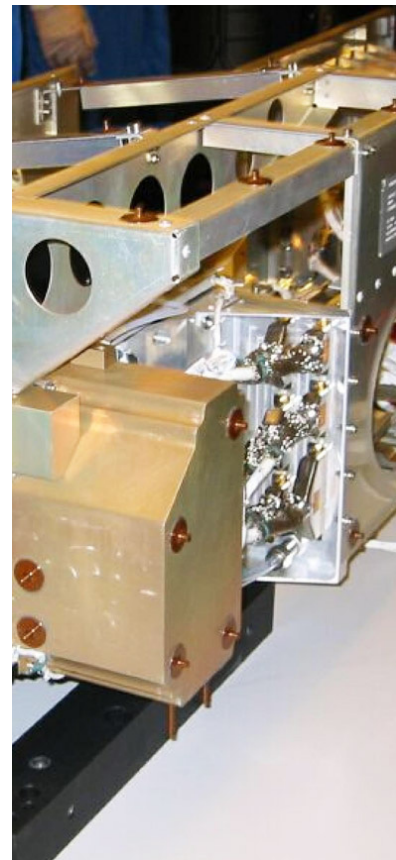
De verdeling van NO_2 over de hele aarde, gemeten door OMI (zie kader, rechts), wordt getoond in de figuur op pagina 2. De hoogste concentraties komen voor in Noordoost-Amerika, West-Europa en Oost-Azië, vooral China. Slechts een paar uur nadat NO_2 in de atmosfeer komt (voornamelijk door emissies aan de grond), verdwijnt het weer door chemische afbraak, en daarom laat deze kaart de brongebieden van luchtvervuiling zien. In de geïndustrialiseerde gebieden van de wereld ontstaat NO_2 door verbranding van fossiele brandstoffen door verkeer, energiecentrales, industrie en scheepvaart. In de tropen zijn er ook natuurlijke bronnen van NO_2 , zoals bliksem en bosbranden.

De belangrijkste brongebieden voor NO_2 in Europa (zie figuur 1) zijn het Ruhrgebied en de Po-vallei, grote havens zoals Rotterdam en Antwerpen, en steden zoals Londen, Parijs, de Randstad, Frankfurt en Moskou. Als we inzoomen op Nederland (zie pag. 4), valt op dat vooral de zuidelijke helft van Nederland vervuild is, en dat de omgeving van Rotterdam-Den Haag de hoogste concentraties van NO_2 heeft.

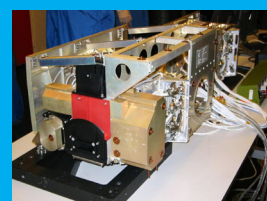
Op het KNMI werken onderzoekers Ronald van der A, Folkert Boersma, Patricia Castellanos, Henk Eskes en Bas Mijling aan de analyse van de NO_2 -metingen van OMI en andere satellietinstrumenten. De NO_2 -concentratie laat sinds 1995 een langzame afname zien in Noord-Amerika en West-Europa door maatregelen ter verbetering van de luchtkwaliteit. Maar in China is er een sterke toename door de economische groei. Men kan zien in figuur 2 hoe de economische crisis van 2008-2009 de NO_2 -concentratie in Europa heeft laten dalen, bovenop de daling door luchtkwaliteitsmaatregelen. Er zijn tussen de landen in Europa ook duidelijke verschillen zichtbaar. Zo kunnen satellietmetingen een hulpmiddel zijn om luchtkwaliteit en de economische aspecten en beleidsaspecten daarvan vanuit de ruimte te volgen.



Figuur 2: De wereldwijde economische recessie van 2008-2009 is duidelijk zichtbaar in de vermindering van de luchtvervuiling door NO_2 in Europa. De rechter figuur toont de procentuele verandering in NO_2 gemeten door OMI in de periode 2008-2009. De linker figuur toont de verandering in de periode 2004-2010. In deze periode neemt de luchtvervuiling in grote delen van Europa af, zowel door de economische recessie van 2008-2009 als ten gevolge van luchtkwaliteitsmaatregelen. In andere delen van Europa neemt de luchtvervuiling juist toe in de periode 2004-2010 t.g.v. urbanisatie (Groot-Brittannië) en nieuwe energiecentrales (Polen, Turkije).



OMI (Ozone Monitoring Instrument) is een Nederlands - Fins satellietinstrument aan boord van de Amerikaanse satelliet Aura. Sinds 2004 meet OMI dagelijks NO_2 , ozon, en andere gassen over de gehele aarde. OMI is net als zijn voorgangers GOME en SCIAMACHY een instrument dat de gasconcentratie bepaalt uit het door de aarde teruggekaatste zonlicht. OMI is gebouwd door de Nederlandse bedrijven Dutch Space en TNO en de elektronica door de Finse industrie. De opvolger van OMI en SCIAMACHY, TROPOMI genaamd, wordt op dit moment gebouwd door de Nederlandse ruimtevaart-industrie in een Europese samenwerking. Het KNMI heeft de wetenschappelijke leiding van OMI en TROPOMI.



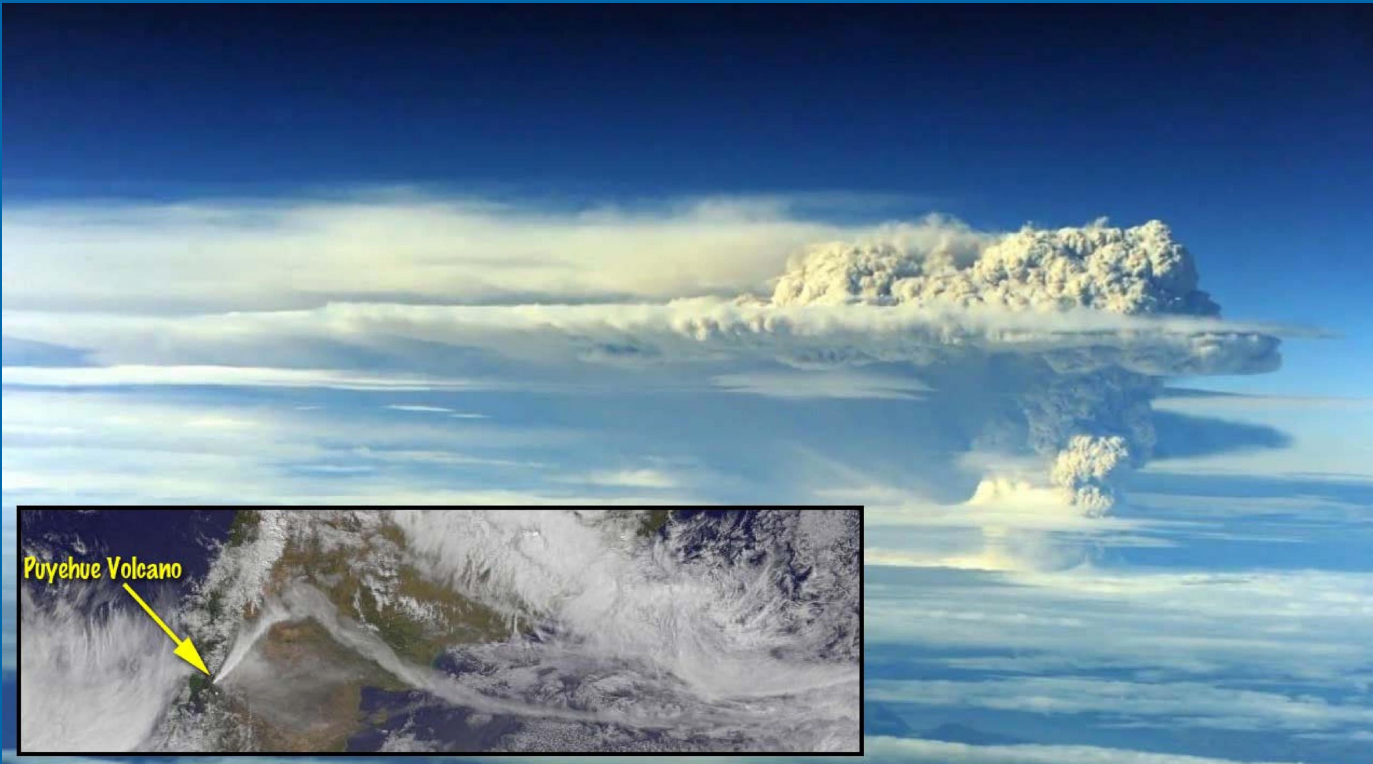
Het OMI instrument weegt ongeveer 65 kg en is 50 cm × 40 cm × 35 cm groot en met pixels van 13 × 24 km.

Arriva		
Flights for Thursday, April 15th 2010		
14:00 Dubai	BA108	Delayed
18:05 Lusaka	BA254	Delayed
18:15 Mumbai	BA198	Delayed
Flights for Friday, April 16th 2010		
05:25 Hong Kong	BA028	Delayed
05:55 Nairobi	BA064	Delayed
06:20 Johannesburg	BA056	Delayed
06:35 Doha	BA124	Delayed
via: Bahrain		
06:40 Muscat	BA072	Delayed
via: Abu Dhabi		
06:50 Cape Town	BA058	Delayed
07:20 Johannesburg	BA054	Delayed
07:20 Buenos Aires	BA246	Delayed
07:20 via: Sao Paulo		
07:30 Mumbai	BA138	Delayed
12:15 Manchester	BA1391	Cancelled
12:35 Paris CdG	BA309	Cancelled
12:40 Geneva	BA727	Cancelled
12:50 Toulouse	BA373	Cancelled
13:00 Milan-Malpensa	BA573	Cancelled
13:05 Basel	BA753	Cancelled
13:15 Newcastle	BA1327	Cancelled
13:15 Berlin	BA983	Cancelled

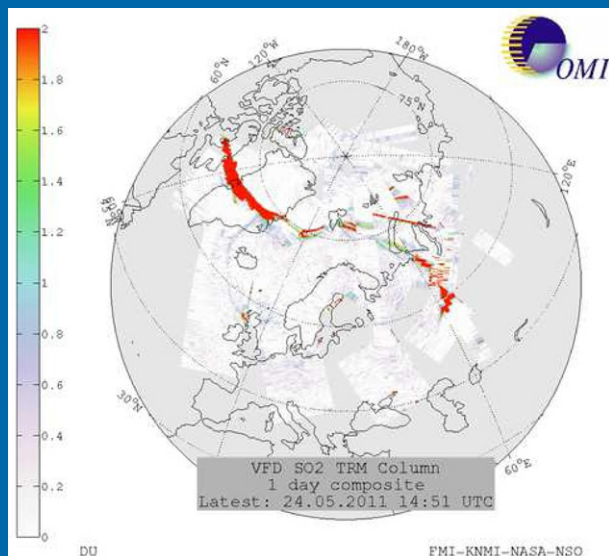
Vinger aan de pols bij vulkaanuitbarstingen

We kennen ze uit de media: foto’s van gestrande reizigers op het vliegveld die met frustratie naar de borden uit ‘Flight cancelled’ kijken. Sinds de vulkaanuitbarsting van de IJslandse Eyjafjallajökull in het voorjaar van 2010 weet heel Europa wat de gevolgen ervan kunnen zijn voor de samenleving. Het luchtruim ging boven delen van Europa verschillende malen dicht, met gestrande passagiers, chaos in het vliegverkeer en economische schade tot gevolg.

Tegenwoordig zijn er verschillende satellieten zoals OMI, GOME-2, SCIAMACHY en SEVIRI die wereldwijd vulkaanuitbarstingen kunnen waarnemen. Deze instrumenten detecteren de door vulkanen uitgestoten wolken van as en zwaveldioxide. Op het KNMI levert onderzoeker Jos de Laat met anderen een belangrijke bijdrage aan het in de gaten houden van vulkanen en vulkaanuitbarstingen: komt de vulkaanas bijvoorbeeld boven Nederland?



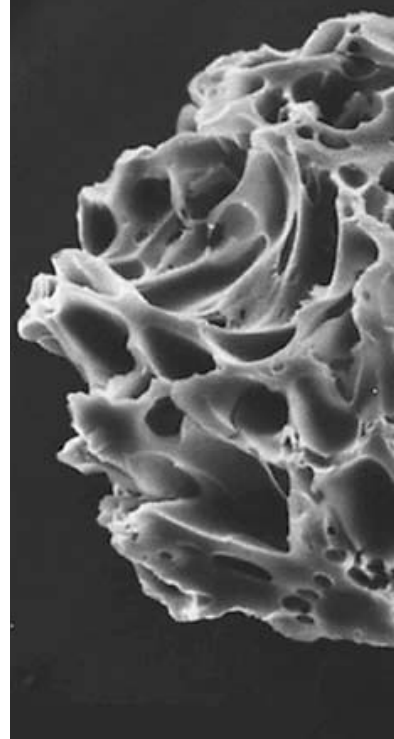
Figuur 1: Aspluim van de Puyehue vulkaan in Chili gefotografeerd vanuit een vliegtuig kort na het begin van de uitbarstingen. Inzet: aspluim van de Puyehue vulkaan gezien door het MODIS instrument aan boord van de Amerikaanse Aqua satelliet op 6 juni 2011.



Figuur 2: SO₂ pluim van de Grimsvötn eruptie, 24 mei 2011.



© AFP alle rechten voorbehouden



Uitvergroting van vulkaansteeltje (30 miljoenste van een meter). Deze deeltjes kunnen grote schade aan vliegtuigen veroorzaken.

Ook in 2011 was het een paar keer raak. Op 21 mei 2011 barstte de IJslandse vulkaan Grimsvötn uit. Een deel van de as trok in de daaropvolgende dagen over noordelijk Europa. Maar 'dankzij' de problemen van 2010 waren autoriteiten beter voorbereid en bleef de overlast voor het vliegverkeer beperkt. Een relatief kleine aswolk op een hoogte van ongeveer 3 km trok op 4 mei over de Noordzee en zuidelijk Scandinavië naar het oosten. Deze aswolk kon dankzij de satellietinstrumenten nauwlettend door het KNMI in de gaten worden gehouden.

Naast de as werd door de Grimsvötn ook veel zwaveldioxide (SO₂) uitgestoten. Maar de zwaveldioxide bereikte veel grotere hoogtes dan de as - tot ver boven 10 km hoogte - en verspreidde zich richting noord Canada. In de dagen daarna cirkelde de wolk SO₂ over de Atlantische Oceaan terug naar Scandinavië, zoals bleek uit satellietwaarnemingen.

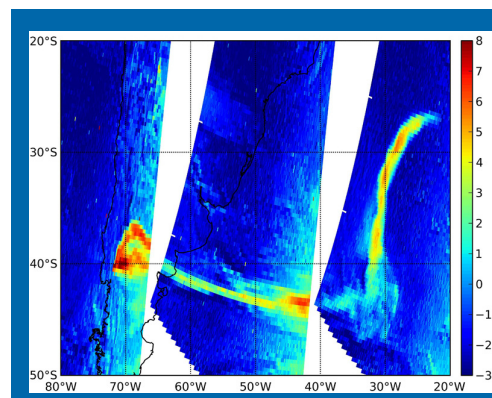
Kort daarop, begin juni 2011, barstte in Chili de Puyehue vulkaan uit. De aspluim bereikte ook bij deze uitbarsting al snel grote hoogtes. De as werd door sterke winden in een week tijd naar de andere kant van de wereld geblazen, waar het vliegverkeer boven Australië en Nieuw Zeeland werd verstoord. Ook hier was de as via de satellietinstrumenten uitstekend te volgen, ook al bevond deze zich grotendeels boven de onbewoonde zuidelijke oceanen.

Maar daarmee was het nog niet gedaan. Op 13 juni barstte de Nebro uit, die zich in het grensgebied

van Eritrea en Ethiopië bevindt. Die vulkaan ligt in een relatief onherbergzaam gebied en ver van grote luchtvaartroutes, maar dankzij de verschillende satellietwaarnemingen kon ook de activiteit van deze vulkaan goed in de gaten gehouden worden, wat maar weer eens de toegevoegde waarde van satellietwaarnemingen aantoont. Al snel bleek dat deze vulkaan weinig as uitbraakte, maar veel zwaveldioxide. Grote wolken verspreidden zich snel via noordelijk Afrika naar het Midden Oosten richting Zuid- en Oost-Azië. Eind juni was de meeste zwaveldioxide weer opgelost.

Een animatie van satellietwaarnemingen van vulkaanpluimen door het Nederlands-Finse satellietinstrument OMI is te vinden op Youtube.

<http://www.youtube.com/watch?v=iCCqQCIWvA4>



Figuur 3: Aspluim van de Puyehue vulkaan (Chili) op 6 juni 2011, waargenomen door het GOME-2 instrument aan boord van de Metop-A satelliet van EUMETSAT. De aspluim werd door de wind over grote afstanden meegevoerd en bereikte zelfs Australië en Nieuw-Zeeland en zorgde daar voor vertragingen van het vliegverkeer.



Regenboog: het volmaakte product van zon en regen.

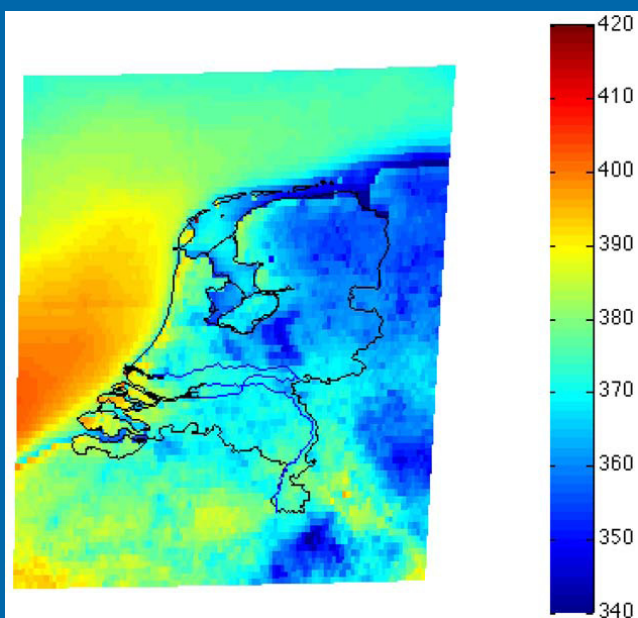
Satellietmetingen van zon en regen in Nederland

Zon en regen spelen een grote rol in het dagelijks leven. Beide worden voornamelijk bepaald door de bewolking. Met meer en dikkere bewolking is het minder zonnig. Bewolking betekent neerslag: regen of sneeuw. Voor sectoren van de Nederlandse economie, zoals het toerisme, zonne-energiewinning en infrastructuur (bijv. riolering), is het belangrijk om over gedetailleerde kaarten van zonnestraling en neerslag te beschikken. De Bosatlas van het Klimaat die in 2011 is uitgegeven kan daarvoor worden gebruikt. Echter daarin zijn alleen meetgegevens aan de grond verwerkt.

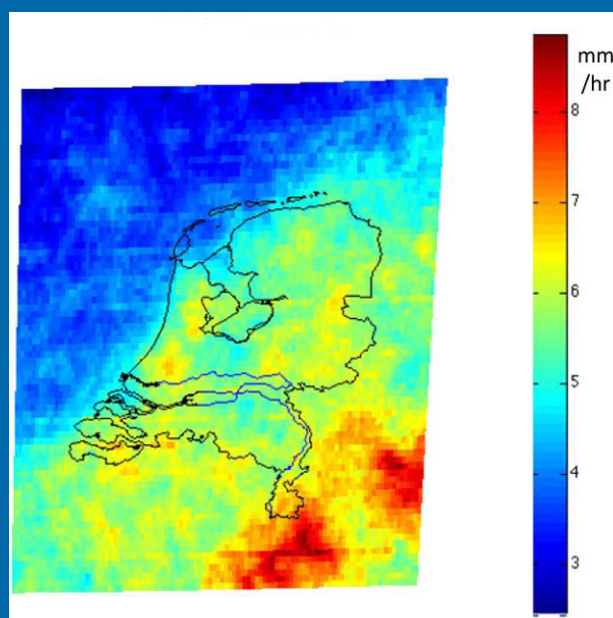
KNMI-onderzoekers Brent Maddux, Jan Fokke Meiring, Erwin Wolters, Wouter Greuell en Rob Roebe-

ling hebben methodes ontwikkeld om dergelijke kaarten nu ook uit satellietmetingen te maken. Hiermee geven zij een voorproefje van de manier waarop een toekomstige Bosatlas van het Klimaat kan worden gemaakt.

De metingen die voor deze nieuwe kaarten zijn gebruikt komen van het SEVIRI-instrument aan boord van de Meteosat-satelliet (zie kader, pagina 11). SEVIRI maakt elk kwartier een opname van Europa en Afrika met als kleinste detail boven Nederland een oppervlak van $7 \times 4 \text{ km}^2$. Deze detaillering overtreft die van de klimatologische grondstations ruimschoots en levert dus veel extra



Figuur 1: Gemiddelde hoeveelheid zonnestraling per jaar, in kJ/cm^2 , in de periode 2005-2009, bepaald uit SEVIRI-satellietmetingen.



Figuur 2: Gemiddelde sterkte van de neerslag in de periode 2005-2009, bepaald uit SEVIRI-satellietmetingen.

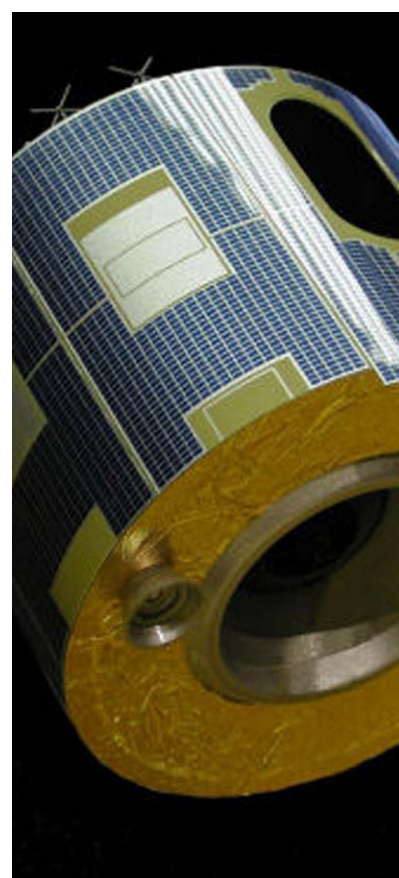
nuttige informatie. De bewolkingsgegevens waaruit zonnestraling en neerslag worden bepaald, komen van drie meetkanalen aan boord van de satelliet. Deze metingen worden gebruikt in een model van de atmosfeer, zodat de zonnestraling aan de grond en neerslag kunnen worden afgeleid.

De nieuwe satellietklimatologie levert een belangrijke aanvulling op de grondmetingen: het voordeel van satellietmetingen is de hoge detaillering, en er kan ook boven zee worden gemeten. Het KNMI heeft in Nederland een netwerk van 34 meetstations voor zonnestraling en 325 meetstations voor neerslag. Het SEVIRI-instrument levert zo'n 1500 meetpunten boven Nederland. Daardoor worden ruimtelijke patronen in zonnestraling en neerslag beter zichtbaar dan met de grondmetingen. De gemiddelde kaarten van zonnestraling en neerslag die in figuren 1 en 2 worden getoond, hebben betrekking op de periode 2005-2009.

De jaarlijkse hoeveelheid zonnestraling in Nederland, zoals getoond in figuur 1, varieert sterk. Aan de kust is het veel zonniger dan in het binnenland. Zo blijkt Zeeland de zonnigste provincie te zijn. Dit is al bekend uit de grondmetingen (zie de Klimaatatlas, 2011). Wat nieuw is in de satellietkaart is dat het heel zonnig is boven de Noordzee; er is circa 10% meer zonnestraling dan boven land. Ook zijn de Veluwe, de Utrechtse Heuvelrug en Drenthe goed te zien in

het plaatje. Dit zijn heuvelachtige gebieden waar meer bewolking ontstaat zodat het daar minder zonnig is.

De neerslagkaart in figuur 2 toont de jaargemiddelde neerslag intensiteit in mm/uur voor de momenten dat het regent. Ook hier zien we interessante patronen; het regent bijvoorbeeld meer bij Rotterdam, Amsterdam en op de Veluwe dan in andere delen van Nederland. Dat zien we ook terug in de grondmetingen (zie de Klimaatatlas, 2011). Boven de Noordzee blijkt het veel minder te regenen dan boven land. Aangezien voor deze kaart maar 5 jaar aan satellietgegevens is gebruikt in plaats van de 30 jaar die normaal voor een klimaatperiode staat, is er nogal veel 'ruis' in deze kaart. De komende jaren zullen met satellieten nog meer gegevens worden verzameld om op die manier een klimatologie op te bouwen, met meer ruimtelijke details dan ooit met grondgegevens kan worden bereikt.

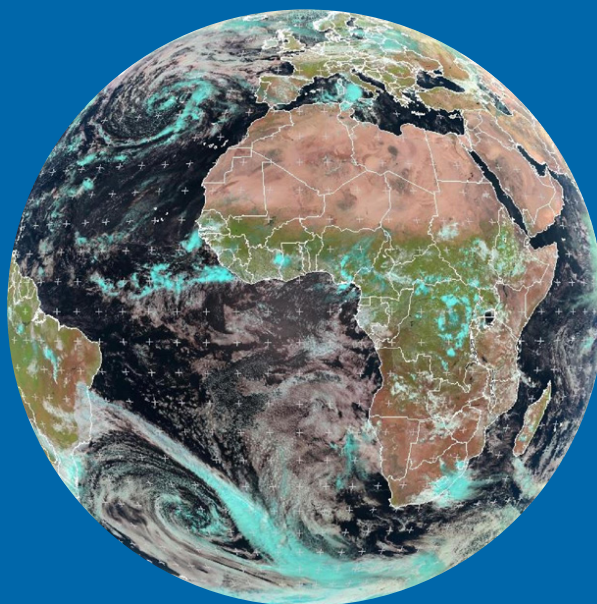


SEVIRI staat voor Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager. Het is een instrument aan boord van de tweede generatie Meteosat-satellieten (MSG), waarvan EUMETSAT er sinds 2002 twee uit een serie van vier heeft gelanceerd. De MSG-satellieten bevinden zich op ongeveer 36.000 km hoogte boven een vast punt op de evenaar. Van daaruit maakt de SEVIRI elk kwartier opnames van de aarde in twaalf golflengtebanden (zie figuur 3). De ruimtelijke resolutie is $3 \times 3 \text{ km}^2$ recht onder de satelliet, maar neemt iets af richting de rand van het beeld.

Figuur 3: SEVIRI-beeld gebaseerd op een combinatie van drie banden: $0,6 \mu\text{m}$ (blauw), $0,8 \mu\text{m}$ (groen) en $1,6 \mu\text{m}$ (rood). Vegetatie ziet er hierin groen uit, zand bruin, en water zwart. Waterwolken hebben een grijs-witte kleur, terwijl ijswolken blauw-groenig (cyaan) zijn.

Noot:

Dit werk wordt verricht in het kader van het Climate Monitoring Satellite Application Facility (CM-SAF) project van EUMETSAT, het Climate Change Initiative (CCI-Clouds) project van ESA en het EURO4M project van de EU.





De luchtvervuiling veroorzaakt door een containerschip zoals hier in de Rotterdamse haven, is even groot als de luchtvervuiling door 50 miljoen auto's.

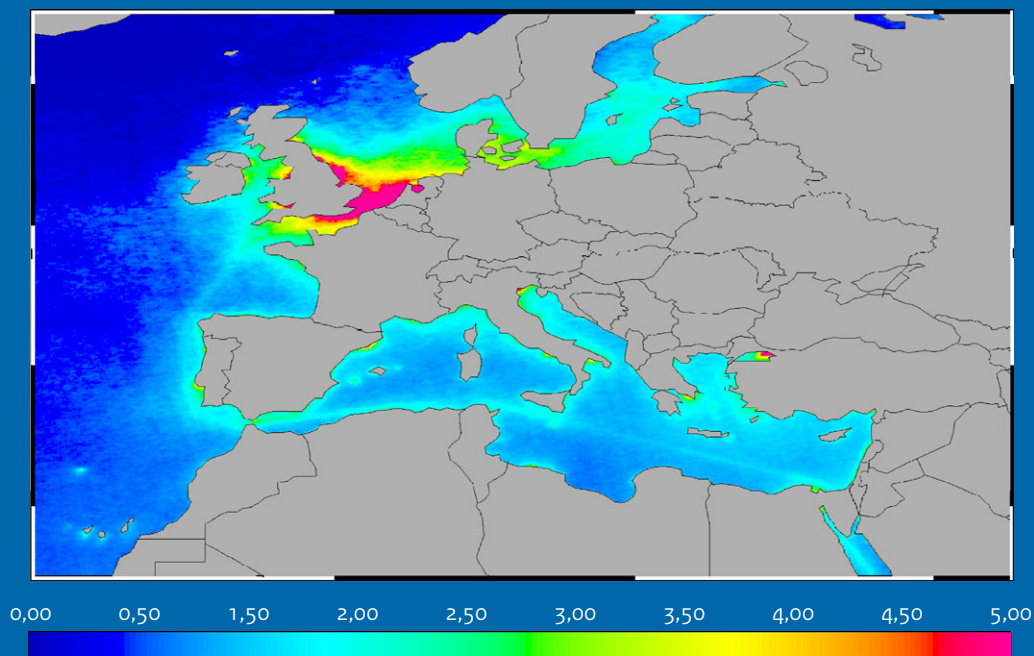
Worden normen voor luchtvervuiling in de scheepvaart nageleefd?

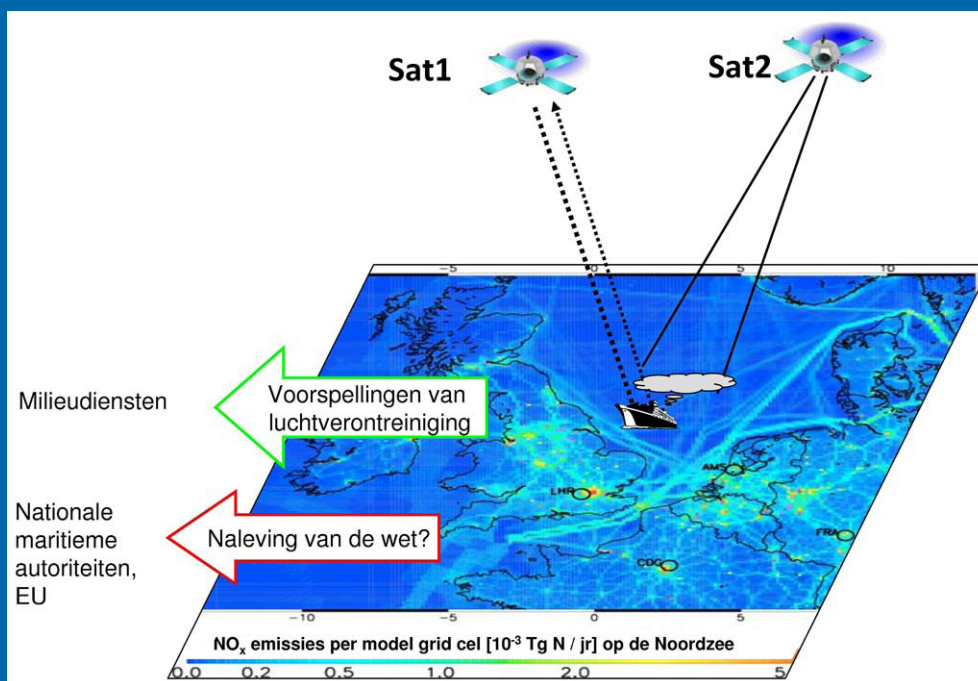
Dat de internationale scheepvaart voor veel luchtvervuiling zorgt, is alom bekend. Maar dat één enkel reusachtig containerschip dezelfde hoeveelheid kanker- en astmaverwekkende stoffen kan uitstoten als 50 miljoen auto's, is een opzienbarende vondst uit recent onderzoek. Dit kost de zorgsector jaarlijks miljarden euro's, met name omdat veel meer mensen dure behandelingen tegen kanker en hartziektes moeten ondergaan. Volgens het RIVM overlijden er per jaar ruim 2000 Nederlanders voortijdig als gevolg van hun blootstelling aan luchtvervuiling waarvan een deel door schepen wordt veroorzaakt. Zeeschepen zijn zo vervuilend omdat zij varen op de meest vervuilende brandstof die er bestaat: stookolie. In de rook uit de scheepsschoorstenen zitten

veel roet, zwavel- en stikstofoxides. De Europese Commissie heeft daarom voorgesteld om zogenaamde 'Emission Control Areas' in te stellen. In deze gebieden moeten schepen vanaf 2015 voldoen aan strengere normen voor hun zwavel- en stikstofoxide uitstoot.

Maar hoe gaat de Europese Commissie de maatregelen voor de scheepvaartsector afdwingen? Immers, op zee kan geen toezicht gehouden worden op naleving. Door KNMI-onderzoeker Folkert Boersma en Bram Maasackers van de Technische Universiteit Eindhoven wordt gewerkt aan de ontwikkeling van technieken die gebruik maken van satellietmetingen om de naleving van de nieuwe regels te controleren. Satellieten leveren boven zee unieke informatie die

Figuur 1: Gemiddelde troposferische stikstofdioxide (NO_2) kolommen in 10^{15} molec./ cm^2 boven zee gemeten met OMI voor de zomers van 2005-2007 boven Europa. Duidelijk herkenbaar zijn de scheepvaartroutes in de Rode Zee, vanaf het Suezkanaal door de Middellandse Zee, rondom het Iberisch Schiereiland, en naar het Kanaal. Daarnaast zijn duidelijk verhoogde achtergrondconcentraties zichtbaar in de nabijheid van grote steden (Istanbul), en sterk geïndustrialiseerde gebieden (Noordzee).





Figuur 2: De satelliet linksboven verstuurt geositie informatie van schepen naar de aarde. Deze wordt gebruikt om de uitstoot van NO_2 te berekenen met behulp een chemisch transport model. De uitkomsten van dit model worden vergeleken met de metingen van NO_2 die gedaan worden door de satelliet rechtsboven. De resultaten van deze vergelijking worden gebruikt om te controleren of de uitstoot van vervuiling wel of niet boven wettelijke normen uitkomt, en voor het maken van voorspellingen van luchtverontreiniging.

niet met traditionele technieken vanaf het oppervlak (zoals op het vaste land) beschikbaar komt. Daarnaast gebruiken satellietinstrumenten een identieke techniek, zodat de metingen in verschillende gebieden onderling goed vergelijkbaar zijn. Figuur 1 geeft een voorbeeld van wat met het Ozone Monitoring Instrument vanuit de ruimte 'gezien' wordt: de luchtvervuiling in de vorm van verhoogde stikstofdioxide concentraties (NO_2) is goed herkenbaar in de scheepvaartroutes dwars door de Middellandse Zee, en vanaf het Iberisch schiereiland naar het Kanaal. Boersma zal samen met collega's van het Finse Meteorologisch Instituut, Geert Vinken van de Technische Universiteit Eindhoven en met belanghebbenden uit de scheepvaartsector onderzoeken of een 'compliance monitoring' systeem kan worden ontwikkeld. Hiermee zal de luchtvervuiling boven de Noordzee en de Baltische zee zo nauwkeurig mogelijk in kaart worden gebracht. Daarna wordt rapport uitgebracht aan havenbedrijven en milieudiensten over mogelijke overschrijdingen van de normen.

Behalve informatie over de locatie en vaarsnelheid van schepen zal het systeem gebruik maken van de KNMI-satellietmetingen van luchtvervuiling (in dit geval stikstofdioxide-concentraties) boven de Noordzee en de Baltische Zee. Om te verifiëren of de vloot zich ook daadwerkelijk aan nieuwe regels houdt en de beoogde emissiereducties gehaald worden, zullen de satellietmetingen naast de modelverwachtingen gelegd worden.

Vanaf 2012 hoopt het KNMI samen met havenbedrijven, milieudiensten en andere belanghebbenden actueel en nauwkeurig te kunnen informeren over schonere lucht in de Europese kustgebieden, met name Rotterdam en omgeving. Vanaf 2015 zal het nieuwe Nederlandse instrument TROPOMI daar een aanzienlijke bijdrage aan gaan leveren. Dit instrument werkt volgens dezelfde principes als OMI, maar is in staat om veel meer detail te zien (pixels zijn $7 \times 7 \text{ km}^2$ en bij OMI $13 \times 24 \text{ km}^2$), zodat de vervuiling door zeeschepen nog beter gecontroleerd kan worden.





Kwaliteitscontrole met grondmetingen en weerballonnen

De KNMI meetmast in Cabauw ligt vlakbij Lopik in het Groene Hart van Nederland. De mast is 213 meter hoog, en wordt gebruikt voor onderzoek van de atmosfeer en validatie van satellietmetingen.

MAX-DOAS staat voor Multi Axis Differential Optical Absorption spectroscopy.



Satellietinstrumenten kunnen wel wereldwijd meten, maar de kwaliteit van de metingen moet goed worden gevolgd. Immers, instrumenten in de ruimte verouderen en kunnen niet opnieuw, of slechts indirect, worden geijkt. Daarom zijn referentiemetingen op de grond van groot belang om de kwaliteit van de satellietproducten op een constant peil te houden. In De Bilt en op het terrein van de meetmast in Cabauw worden metingen gedaan voor kwaliteitscontrole van de satellietmetingen; dat proces noemen we validatie. De meetmast in Cabauw is onderdeel van een internationaal netwerk van meetstations.

Met een instrument van het type MAX-DOAS (zie figuur 1) kunnen vanaf de grond metingen worden verricht waaruit de totale hoeveelheid NO_2 kan worden afgeleid. Een MAX-DOAS-instrument kijkt onder verschillende hoeken naar de hemel. Het detecteert door de atmosfeer verstrooid zonlicht in het ultraviolette en zichtbare deel van het spectrum. De precieze hoeveelheid stikstofdioxide wordt afgeleid uit de gemeten lichtabsorptie door dit gas. Dit relatief

eenvoudige en goedkope instrument kan volledig geautomatiseerd waarnemen. Lange tijdreeksen zijn waardevol voor het bepalen van de kwaliteit van satellietmetingen. Onderzoeker Tim Vlemmix, verbonden aan het KNMI en de Technische Universiteit Eindhoven, promoveerde op dit onderzoek op 15 december 2011 met zijn proefschrift 'Tropospheric nitrogen dioxide inversions based on spectral measurements of scattered sunlight'.

Ozonmetingen vanaf de grond vinden plaats in De Bilt. Wekelijks wordt een speciale weerballon opgelaten uitgerust met een sensor die de concentratie van ozon in de lucht kan meten. Recent is op het KNMI door onderzoekers Marc Allaart en Wesley Sluis ook een sensor ontwikkeld die de concentratie van NO_2 kan meten. Daarmee kan de verticale verdeling van het luchtvervuilingsgas NO_2 worden gemeten. Die informatie is niet alleen belangrijk voor het beter begrijpen van de satellietmetingen maar ook om verwachtingsmodellen voor luchtkwaliteit te toetsen.



Figuur 1: Instrumenten die NO_2 kunnen meten verrichten continu waarnemingen vanaf de KNMI meetmast bij Cabauw (gemeente Lopik). De schaduw van de 213 meter hoge mast is zichtbaar op de foto.



Figuur 2: Wekelijks wordt in De Bilt een ballon opgelaten om de chemische samenstelling van de lucht te meten. Deze metingen worden gebruikt om satellietmetingen van ozon en NO_2 te valideren.

Nauwkeurige neerslagbepalingen uit satellietdata

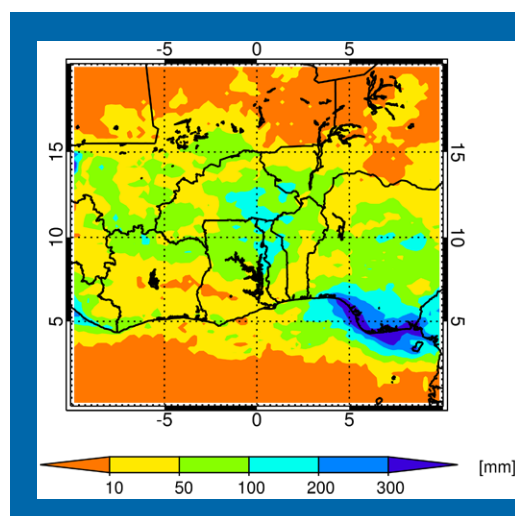


De term ‘buienradar’ is een begrip in Nederland. Iedereen die een barbecue organiseert kijkt even op internet of er het komende uur regen gaat vallen. De neerslagplaatjes van het KNMI zijn opgebouwd uit gegevens van twee radars. En er komt complexe software aan te pas om die gegevens om te zetten in een regenproduct dat wij allemaal van het internet aflezen.

KNMI-onderzoeker Erwin Wolters heeft in zijn proefschrift ‘Satellite cloud and precipitation property retrievals for climate monitoring and hydrological purposes’, dat op 29 maart 2012 aan de Universiteit Utrecht zal worden verdedigd, aangetoond dat een nauwkeurige bepaling van regen nu ook kan worden verkregen met satellietmetingen. Hiervoor werden de metingen vergeleken met regenmetergegevens.

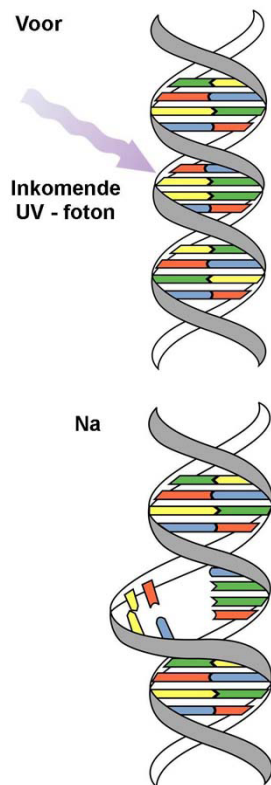
Het onderzoek werd verricht met metingen boven West-Afrika tijdens het moessonseizoen, wanneer met grote regelmaat zware buien over het continent trekken. Dat is handig als je veel vergelijkingsmateriaal wilt hebben, variërend van motregen tot stortregen. De Meteosat-satelliet verricht elke 15 minuten metingen van wolken en bestrijkt gebieden van duizenden kilometers. Dat is vele malen meer dan wat een buienradar kan zien. Daarom is het ook mogelijk om het volledige ontwikkelingsstadium van buien te volgen terwijl ze met de wind meedrijven.

Neerslagbepaling uit satellietdata is belangrijk voor weer en hydrologie in Nederland. Voor meteorologen vormen de neerslagschattingen een toevoeging aan de reeds aanwezige weermodel- en regenradarinformatie, terwijl ze door hydrologen kunnen worden gebruikt ter ondersteuning en verbetering van afwateringsberekeningen voor landelijke en stedelijke gebieden.



Figuur 2: Neerslagsommen over West-Afrika voor juli 2005, bepaald uit SEVIRI/Meteosat data. Hoe donkerder de kleur, hoe hoger de neerslagsom.





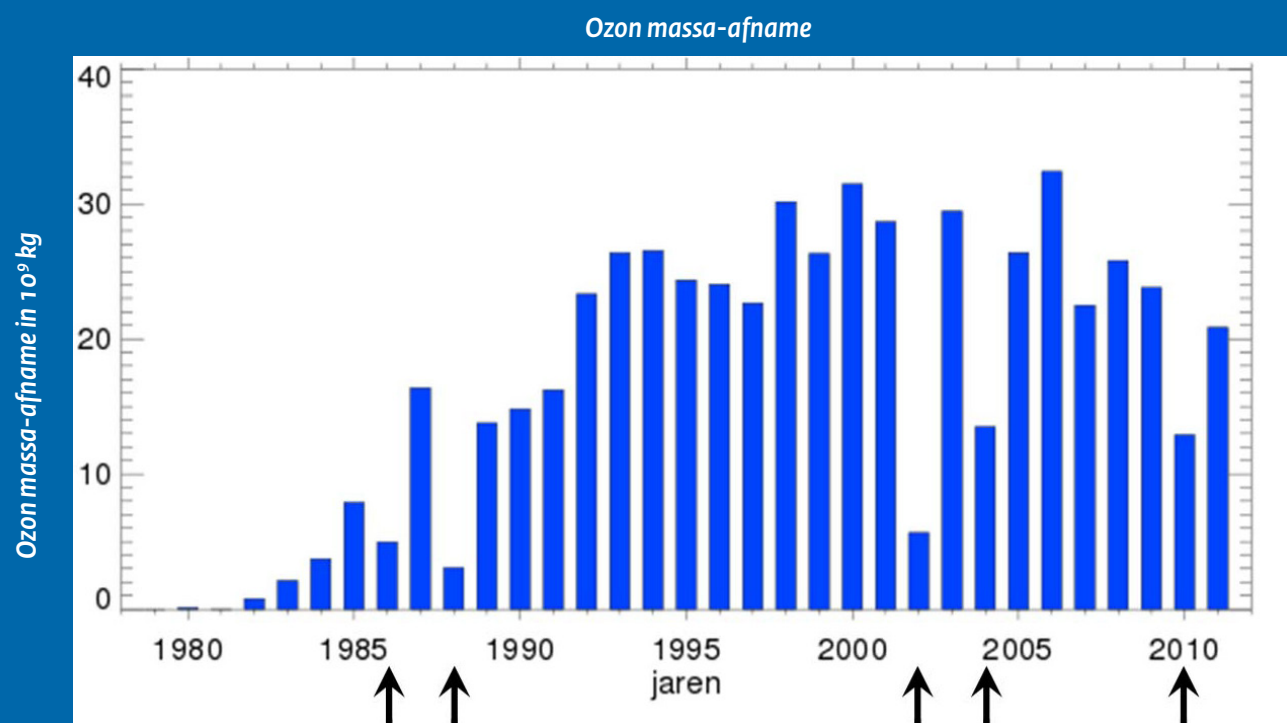
UV-straling kan door het gat in de ozonlaag gemakkelijker de aarde bereiken. Deze UV-straling kan het DNA in cellen aantasten, waardoor deze onherstelbaar veranderen (muteren).

Hoe is het nu eigenlijk gesteld met het ozongat?

Het ozongat boven de Zuidpool kreeg wereldwijde bekendheid na de ontdekking ervan halverwege de jaren '80 van de vorige eeuw. Een gat in de ozonlaag stelt ons bloot aan extra hoge doses UV-straling die huidkanker veroorzaakt en andere schadelijke effecten kan hebben op planten en dieren. Eind jaren '80 en begin jaren '90 werden wereldwijde afspraken gemaakt om de uitstoot van ozonafbrekende stoffen (met name chloorfluorkoolwaterstoffen, de CFK's) te reduceren en uiteindelijk zelfs uit te bannen. Daarmee is het ozongat het eerste mondiale

milieuprobleem waarvoor ook mondiale afspraken zijn gemaakt om emissiebeperkingen op te leggen. De maatregelen zijn succesvol, gezien de eerste tekenen van verbetering die in de atmosfeer worden gesignaleerd. Voor een volledig herstel van het ozongat zullen we echter nog wel enkele tientallen jaren geduld moeten hebben.

Met het succes van de maatregelen verdwijnt ook een beetje de aandacht voor het ozongat. Niettemin vormt het ozongat zich nog altijd ieder jaar boven



Figuur 1: De totale hoeveelheid ozonafbraak per jaar boven de Zuidpool in 10^9 kilogram ozon. Er doen zich jaren voor - aangegeven met de pijlen - waarin aanzienlijk minder ozonafbraak is. Deze jaren worden allen gekenmerkt door "sudden warmings" op grote hoogte boven de Zuidpool.

de Zuidpool. Niet verwonderlijk, want de afname van ozonafbrekende stoffen is nogal traag: 1 tot 1.5 % per jaar. Op het moment van schrijven zijn er nog altijd veel ozonafbrekende stoffen aanwezig in de atmosfeer: in poolgebieden bedraagt de afname in de hoeveelheid ozonafbrekende stoffen ten opzichte van het maximum rond het jaar 2000 ongeveer 10%. Kortom, er zijn nog veel ozonafbrekende stoffen over om flinke hoeveelheden ozon te vernietigen. Met de geleidelijke afname van ozonafbrekende stoffen zou de diepte van het ozongat langzaam minder moeten worden. Een centrale vraag die in wetenschappelijke kringen nu gesteld wordt is of we de eerste tekenen van herstel kunnen zien. We meten dat de hoeveelheid ozonafbrekende stoffen daalt, maar zien we daarvan ook iets terug in ozon, bijvoorbeeld in de diepte en duur van het jaarlijkse ozongat?

Satellietmetingen geven aan dat vanaf 1980 tot 1995 het ozongat boven de Zuidpool groter en dieper wordt, met stabilisatie daarna (figuur 1). Maar er zijn af en toe jaren met aanzienlijk veel minder ozonafbraak (1986, 1988, 2002, 2004, 2010). Hoe kan dat?

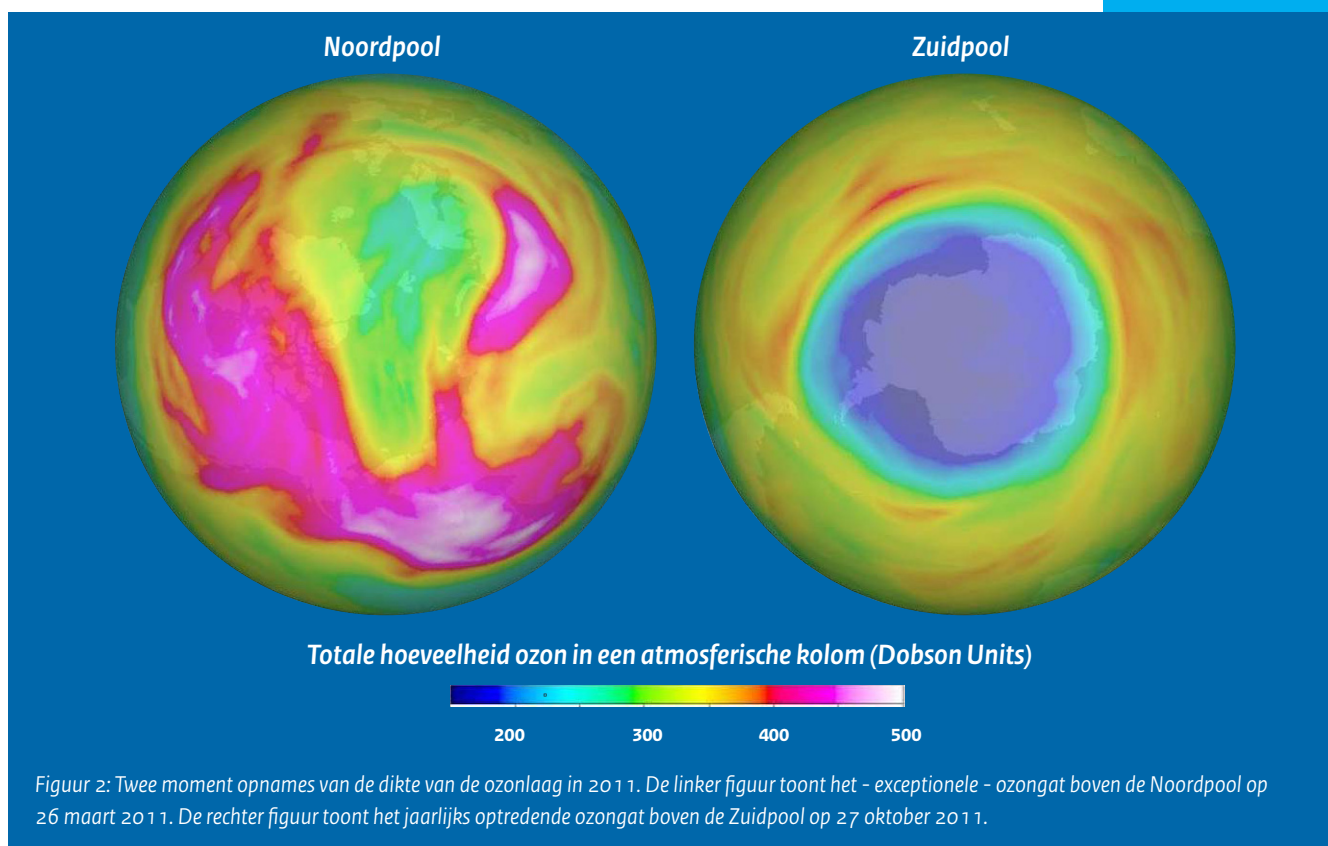
KNMI-onderzoekers Jos de Laat en Michiel van Weele

vonden dat dit het gevolg was van een vroege “sudden warming” die werd veroorzaakt door neerwaarts transport van lucht tussen 25 en 20 km hoogte. Daardoor stijgt de temperatuur, en bij die hogere temperatuur is de chemische vernietiging van ozon veel minder effectief. Gevolg is een minder groot ozongat.

Hoewel veel aandacht uitgaat naar het ozongat boven de Zuidpool, kunnen we een soortgelijk ozongat, maar dan minder groot, ook waarnemen boven de Noordpool (figuur 2). Omdat de lente op het noordelijk halfrond een half jaar eerder is dan op het zuidelijk halfrond valt het jaarlijkse maximum op de Noordpool in maart, en op de Zuidpool in oktober. De grote ozonafbraak boven de Noordpool in het voorjaar van 2011 was een onverwachte gebeurtenis. Het laat zien dat de ozonlaag in relatie tot klimaatverandering nog veel verrassingen in petto heeft, en dat ozonmetingen met satellieten nodig blijven.



Sinds het begin van de jaren 80 van de vorige eeuw wordt ieder voorjaar de ozonlaag zeer dun boven de Geografische Zuidpool op het midden van het Antarc-tische Continent. De laatste jaren is er ook een ozongat boven de Noordpool waargenomen.





Afrika: testlaboratorium voor Nederlandse klimaatmodellen

Het Afrikaanse continent ligt voornamelijk in de (sub) tropen. Het weer wordt daar niet zo beïnvloed door depressies als bij ons. Daarom is het ideaal voor het testen van klimaatmodellen met behulp van satellietkaarten.

Om inzicht te krijgen in het klimaatsysteem op aarde, zijn er computermodellen ontwikkeld die het klimaat nabootsen. Deze klimaatmodellen zijn gebaseerd op de natuurkundige wetmatigheden die ten grondslag liggen aan het klimaat. De toestand van de atmosfeer wordt vastgelegd in elke cel van een rooster dat over de hele aarde wordt geprojecteerd. Uitgaande van zo'n toestand berekent een computer (zoals bijvoorbeeld een NASA computer hier weergegeven) een nieuwe toestand een tijdstep later. Hierdoor kan in kleine stappen de toekomstige ontwikkeling van het klimaat berekend worden.



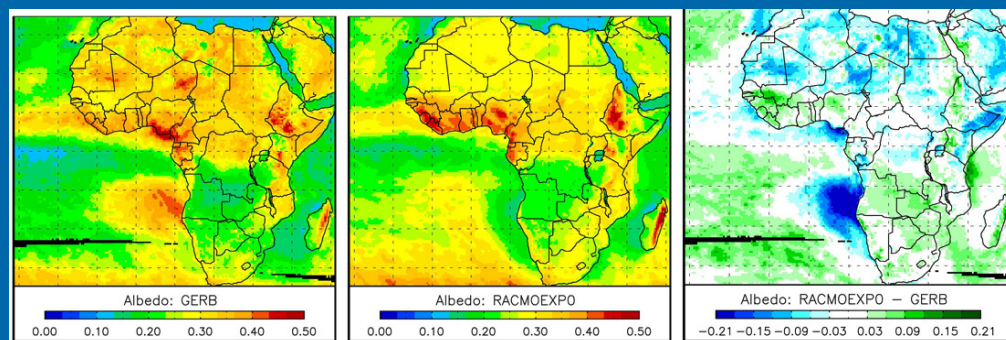
Berekeningen van toekomstige klimaatveranderingen en scenario's voor Nederland worden met klimaatmodellen gemaakt. Daarvoor gebruikt het KNMI zijn eigen regionale klimaatmodel (RACMO). In vergelijking met andere modellen doet RACMO het uitstekend, maar het vergelijken van modellen met metingen moet continu worden uitgevoerd. Immers, er zit doorlopend ontwikkeling in de beschrijving van klimaatprocessen in deze modellen.

KNMI-onderzoekers Wouter Greuell, Erik van Meijgaard en Jan-Fokke Meirink hebben in samenwerking met Belgische collega's de kwaliteit van de RACMO-berekeningen onderzocht. Hiervoor werd Afrika en de aangrenzende oceanen als 'testlaboratorium' gekozen. Waarom doen we die vergelijkingen zo ver van huis, en niet bijvoorbeeld met metingen boven Nederland of West-Europa? Dat komt omdat het weer boven Afrika niet beïnvloed wordt door depressies, zoals dat bij ons wel gebeurt. Wolkenvorming en andere belangrijke klimaatprocessen

worden op die manier niet voortdurend verstoord door voorbijtrekkende weersystemen.

Een klimaatmodel moet tenminste in staat zijn om de fractie zonnestraling die door de aarde naar de ruimte wordt teruggekaatst goed te beschrijven. Hiervoor zijn nauwkeurige metingen van satellieten, zoals van het GERB instrument op de Meteosat-satelliet, beschikbaar als vergelijkingsmateriaal. Deze fractie gereflecteerde zonnestraling wordt weergegeven door de albedo.

Als we alleen naar de waarnemingen en de berekeningen van de albedo kijken in figuur 1, dan zien de berekeningen er voortreffelijk uit, maar het verschilplaatje (rechts in figuur 1) legt toch enkele duidelijke modeltekorten bloot. De grootste aandacht gaat uit naar de gebieden met de grootste fouten, namelijk de Sahara waar er weinig wolken zijn, en het deel van de Atlantische Oceaan voor de kust van Angola en Namibië, waar de hemel vrijwel permanent bedekt is met laaghangende wolkenvel-



Figuur 1: Albedo van Afrika en omgeving zoals gemeten door het GERB-instrument op de Meteosat-satelliet (links), berekend met het klimaatmodel RACMO (midden), en het verschil tussen de twee (rechts).

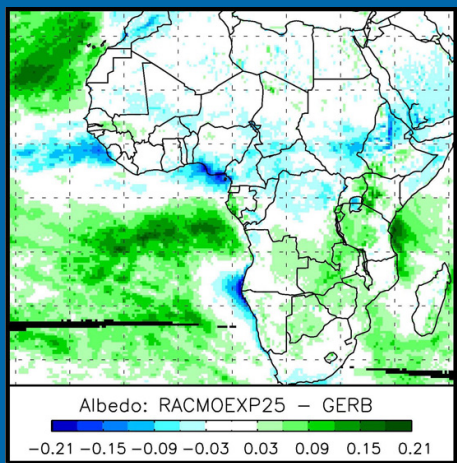


Onze aarde wordt verlicht door de zon. Vanuit de ruimte zien we gebieden die veel zonlicht weerkaatsen (zoals de wolken) als wit. De oceanen en onbewolkte continenten reflecteren minder licht, en die zien we als blauw, bruin of groen. Aangezien het heelal geen zonnestraling reflecteert zien we het heelal als zwart. De mate van weerkaatsing van zonnestraling wordt de albedo genoemd.

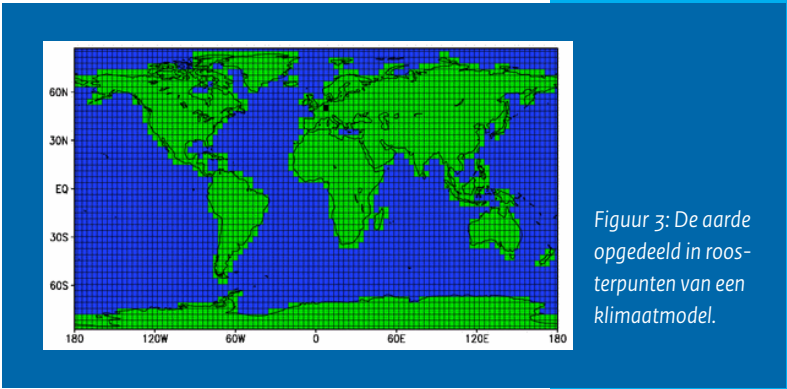
den, zogenaamde stratocumulus. Is het mogelijk om in die gebieden de modellen te verbeteren? Een grote stap voorwaarts kan worden genomen door modelvelden van de reflectie van het aardoppervlak en de grootte van wolkendruppels te vervangen door

satellietmetingen. Dit leidt in beide gebieden tot een spectaculaire verbetering van de berekeningen van de albedo (figuur 2).

Vanwege de afwezigheid van grootschalige depressies is Afrika bij uitstek geschikt voor het doen van dergelijke experimenten met een klimaatmodel, veel meer dan Europa. Het mooie is dat satellietmetingen ons in staat stellen om dergelijke experimenten - op afstand - ook echt uit te voeren. Als het klimaatmodel beter in staat is het huidige klimaat van Afrika te simuleren, dan zullen toekomstprognoses nauwkeuriger worden, ook voor Nederland.



Figuur 2: Verschil tussen de albedo van Afrika en omgeving zoals berekend met een verbeterde versie van het klimaatmodel RACMO en gemeten door het GERB-instrument op de Meteosat-satelliet.



Figuur 3: De aarde opgedeeld in roosterpunten van een klimaatmodel.

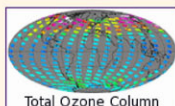


Tropospheric Emission Monitoring Internet Service

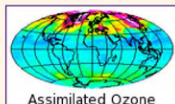


News: 16-years of GOME-1 observations concluded

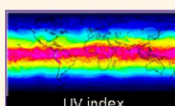
Near-real time data



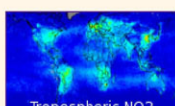
Total Ozone Column



Assimilated Ozone



UV index



Tropospheric NO2



Volcanic plume

Air pollution monitoring

- [Nitrogen Dioxide \(NO₂\)](#)
- [Formaldehyde \(CH₂O\)](#)
- [Nitrogen Dioxide in Central Europe](#)
- [Carbon Monoxide \(CO\)](#)

Ozone and related gases

- [Total ozone columns](#)
- [Assimilated total ozone](#)
- [Bromine monoxide \(BrO\)](#)
- [Ozone hole statistics](#)
- [Ozone profiles](#)

UV radiation

- [Clear sky UV index](#)
- [UV daily dose](#)

Climate Change

- [Aerosol Optical Depth](#)
- [Cloud information](#)
- [Aerosol Index](#)
- [Methane \(CH₄\)](#)

Monitoring volcanic emissions

- [Volcanic plume \(SO₂ and ash\)](#)

User inventory form

Institute:

Name:

Email:

Reason using TEMIS data:

[Introduction](#)

[Utilities](#)

[Overview NRT images](#)

[Google Earth Maps](#)

[Air Quality in China](#)

[Contact](#)

Restricted access

[Internal pages](#)



The TEMIS web site is hosted by [KNMI](#), The Netherlands page last modified: 16 September 2011

Homepage van het TEMIS data portaal, waarop de satellietproducten te vinden zijn.

Deze brochure en de links met informatie over de satellietproducten kunnen verkregen worden op de volgende website:
www.knmi.nl/research/climate_observations/kijk_op_klimaat/2012

Deze website is tevens te bereiken via de QR-code hiernaast.



Deze brochure is een uitgave van:

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

Postbus 201 | 3730 AE De Bilt
T 030 220 69 11 | www.knmi.nl

© KNMI | januari 2012

Links met informatie over de satellietproducten:

TEMIS: www.temis.nl
OMI: www.knmi.nl/omi
SCIAMACHY: www.sciamachy.org
CMSAF - METEOSAT: www.cmsaf.eu
O3MSAF - GOME-2: O3MSAF.FMI.FI/
TROPOMI: www.tropomi.eu