

Satellietwaarnemingen van luchtvervuiling

Folkert Boersma, Henk Eskes en Ronald van der A (KNMI)

Het is medio oktober als de relatieve rust in de afdeling Atmosferische Samenstelling van het KNMI abrupt verstoord wordt. Gedurende bijna een week staat het onderzoek even stil. Onderzoekers rennen van de microfoon van Radio-1 naar de telefoon waar de schrijvende pers uiteenlopend van NRC Handelsblad tot en met de Apeldoornse Courant aan de lijn hangt. Ook het NOS- en RTL-journaal komen poolshoogte nemen. Zelfs de grote oliemaatschappijen tonen veel belangstelling. Wat is er aan de hand? Is de ozonlaag ineens verdwenen? Zijn er oorzaken van plotselinge klimaatverandering vastgesteld? Niets van dit alles. De consternatie wordt veroorzaakt door een nieuwe wereldkaart van de hoeveelheid stikstofdioxide in het onderste deel van de atmosfeer, afgeleid uit metingen van het satellietinstrument SCIAMACHY op de Europese milieusatelliet ENVISAT. Figuur 1 laat een kaart zien van jaargemiddelde NO_2 concentraties voor alle locaties ter wereld waar SCIAMACHY één of meer metingen heeft kunnen doen. Op deze kaart komen het oosten van China en de VS, en Noordwest Europa naar voren als regio's met de hoogste concentraties stikstofdioxiden (NO_2) in de wereld. Maar is die Randstad werkelijk zo 'verstikkend' zoals de Telegraaf kopte en hoe zit het nu precies met stikstofoxiden?

Drie redenen waarom NO_x de lucht vervuult

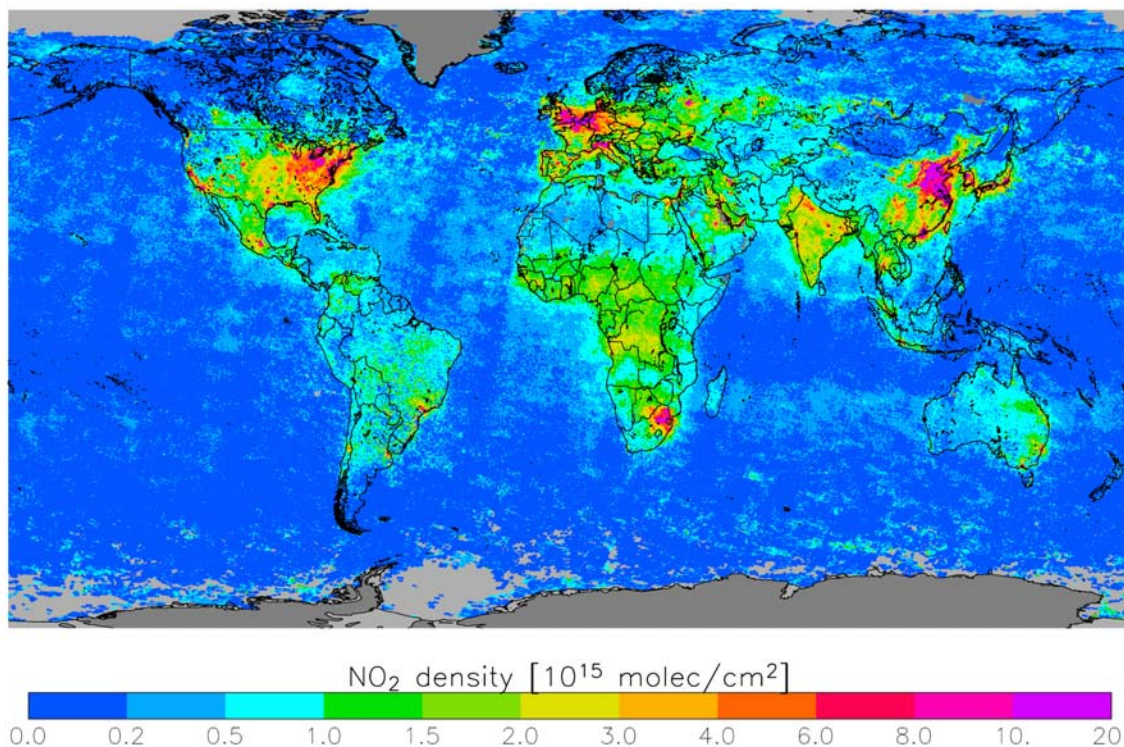
Stikstofoxiden, ofwel NO_x , is de verzamelnaam voor een groep sterk reactieve gassen die allen stikstof (N) en zuurstof (O) bevatten. Stikstofoxiden komen vrij bij processen met een zeer hoge temperatuur. Deze vinden bijvoorbeeld plaats in benzine- en kerosinemotoren, bij industriële processen, en ook bij de verbranding van natuurlijk materiaal (biomassa). In Nederland komt de grootste bijdrage aan de uitstoot van NO_x met 65% van het verkeer. Daarnaast dragen industrie en elektriciteitsopwekking uit fossiele brandstoffen in Nederland sterk bij. Nu is de atmosferische levensduur van stikstofoxiden maar kort (in het algemeen korter dan 24 uur), dus waarom zullen we ons druk maken om de gemiddeld hoge concentraties boven Nederland?

Ten eerste spelen stikstofoxiden een centrale rol bij de vorming van smog. Met name op zonnige dagen in de zomer zijn alle ingrediënten in de atmosfeer aanwezig om een giftig mengsel te brouwen dat 'smog' (oorspronkelijk: *smoke* and *fog*) genoemd wordt: hoge niveaus van zonnestraling, hoge concentraties van stikstofoxiden, en stilstaande luchtlagen die de verdunning van verontreinigende stoffen onmogelijk maken. In dit soort situaties reageren stikstofoxiden onder invloed van zonlicht tot ozon. Ozon in de onderste laag van de atmosfeer wordt in tegenstelling tot de ozon tussen 15 en 50 km hoogte die ons beschermt tegen UV-straling ook wel 'slecht' ozon genoemd. Slecht, omdat ozon een sterk oxiderend gas is dat bij inademing door mensen en dieren tot prikkeling van de luchtwegen leidt. Kinderen en mensen met luchtwegaandoeningen zoals astma zijn bijvoorbeeld erg vatbaar voor de nadelige effecten van ozon zoals beschadiging van longweefsel. Overigens zijn stikstofoxiden zelf ook schadelijk voor onder andere de luchtwegen bij mens en dier. Maar ook planten zijn erg kwetsbaar zijn voor ozon. Zelfs bij lage concentraties neemt de opbrengst van gewassen al drastisch af. Stikstofoxiden produceren dus ozon en hebben daarmee een direct, sterk lokaal effect op de volksgezondheid.

Ten tweede zorgen stikstofoxiden voor verzuring en eutroficatie (bemesting) van het grondoppervlak. Dat zit zo: in combinatie met zwaveldioxide, vormen stikstofoxiden giftige zuren, die op aarde terechtkomen door regen, mist, sneeuw of als droge deeltjes. Vervolgens kunnen sommige van deze zuren biologische mutaties veroorzaken. Zo leiden hoge

concentraties NO_x in de lucht tot een toename van stikstofverbindingen in het water. Met name in de kustgebieden verstoren deze de chemische balans van voedingsstoffen voor waterplanten en dieren, en leiden ze tot een versnelling van de eutroficatie (overbemesting) wat aanleiding geeft tot zuurstofafname en de vermindering van het aantal vissen en schelpdieren. Stikstofoxiden leiden dus indirect tot een verslechtering van de leefomgeving.

SCIAMACHY mean tropospheric NO₂ 2003 KNMI/IASB/ESA



Figuur 1. Gemiddelde troposferische NO₂ kolom in 2003 zoals afgeleid uit SCIAMACHY metingen. In 2003 zijn in totaal ongeveer 30 miljoen metingen gedaan. Deze metingen zijn verzameld op een horizontaal rooster van 1440 bij 720 cellen hetgeen betekent dat elke cel een oppervlak van 0.25 bij 0.25 graden opspant. De gemiddelde NO₂ kolom is bepaald door alle metingen die door SCIAMACHY gedaan zijn onder onbewolkte omstandigheden te middelen. Voor grijze roostercellen is geen betrouwbaar gemiddelde te berekenen omdat er geen metingen gedaan zijn, of omdat er steeds bewolking was of sneeuw of ijs lag. De kleurschaal is niet-lineair: onvervuilde waarden zijn over het algemeen blauw, matig vervuilde waarden groen-geel, en sterke vervuiling oranje-rood.

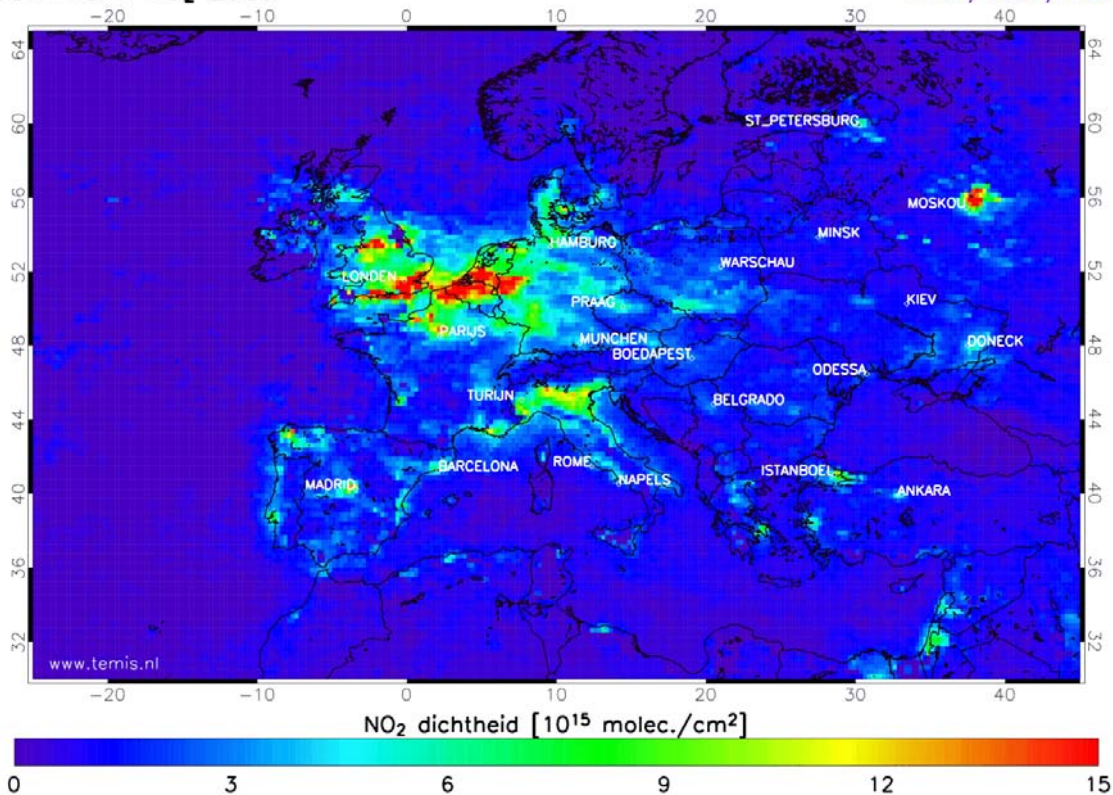
Ten derde zijn stikstofoxiden belangrijk voor klimaatverandering. Ruwweg geldt: hoe meer stikstofoxiden, hoe meer ozon. Ozon is vooral op grote hoogte (10-15 km) een efficiënte 'absorber' van infrarood ofwel langgolvlige straling. Daarom geldt: hoe meer ozon, hoe sterker het broeikas effect. Tegelijkertijd echter genereren stikstofoxiden, samen met waterdamp, zonlicht en ozon, het hydroxyl (OH) molecuul. Deze stof wordt ook wel het schoonmaakmiddel van de atmosfeer genoemd omdat het zo verschrikkelijk reactief is. Een toename van gemiddelde OH-concentraties betekent dat nr. 2 en 3 van de meest vervuilende broeikasgassen (top 3: 1. Koolstofdioxide (CO₂), 2. Methaan (CH₄), 3. Ozon (O₃)) sneller vernietigd worden, en daarmee dat het broeikas effect verzwakt wordt. Hoe de balans precies uitslaat is op dit moment niet zeker vanwege het ingewikkelde karakter van atmosferische scheikunde met haar vele terugkoppelingen. Zo is bijvoorbeeld ozon nodig om hydroxyl te produceren dat op zijn beurt ozon weer afbreekt. Stikstofoxiden spelen hoe dan ook een belangrijke rol in het wereldwijde proces van klimaatverandering en luchtkwaliteit.

De luchtvervuilingskaarten

Er zijn kortom genoeg redenen om de kaart eens nader te bekijken en na te gaan waar NO_2 luchtvervuiling ontstaat. In figuur 1 zijn behalve de al genoemde dichtbevolkte gebieden met veel verkeer en industrie nog een aantal andere opmerkelijke fenomenen terug te vinden. Zo zijn bosbranden en door de mens aangestoken branden met name in de tropen (Afrika) goed te zien. Gemiddeld genomen liggen de vervuilingsniveaus door bosbranden wel een factor 10 lager dan de vervuiling in de industriële gebieden (zie de niet-lineaire kleurschaal). Een opvallende 'hotspot' is verder het Noordoosten van Zuid-Afrika. Een belangrijke bijdrage aan de hoge NO_2 concentraties komt van het 'Highveld plateau' dat zich op ongeveer 1500 m boven zeeniveau bevindt. In dit sterk geïndustrialiseerde gebied bevinden zich op korte afstand van elkaar 8 immense kolencentrales die een groot deel van de energie voor Zuid-Afrika opwekken. De satellietkaart bevestigt dat het Highveld plateau terecht hoog staat in lijstjes van sterkste regionale stikstofoxiden emissiebronnen. Verder is het verschil in NO_2 concentraties boven het Koreaanse schiereiland interessant: de sterke economische activiteit in Zuid-Korea vertaalt zich in vrij hoge NO_2 concentraties, terwijl Noord-Korea relatief schoon is.

SCIAMACHY NO_2 2003

KNMI/BIRA/ESA

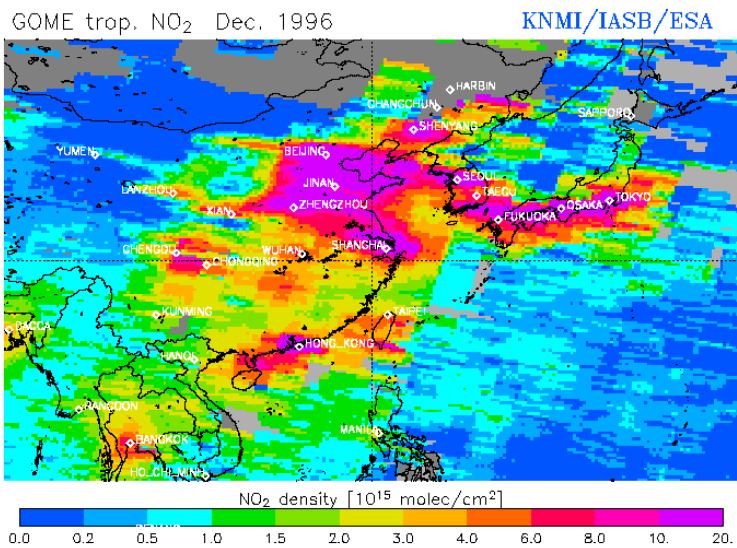


Figuur 2. Gemiddelde troposferische NO_2 kolom in 2003 zoals afgeleid uit SCIAMACHY metingen voor Europa. De niet-lineaire kleurschaal is vervangen door een lineaire-schaal. Hierdoor vallen de matig vervuilde gebieden weg, en krijgen de sterk vervuilde gebieden meer nadruk dan in Figuur 1.

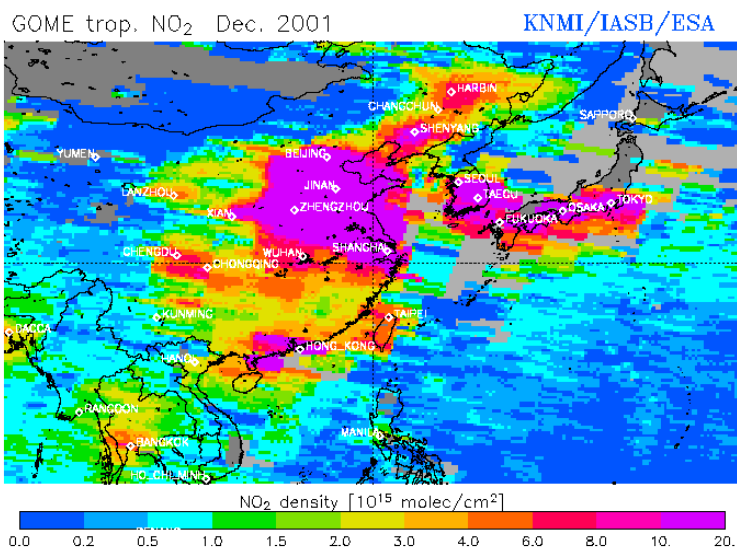
Als we inzoomen op Europa en de niet-lineaire kleurschaal inruilen voor een lineaire, dan komen we terecht bij figuur 2. Deze kaart laat zien dat Zuid-Engeland, een groot deel van België en Nederland, en het Roergebied tot de sterkst vervuilde regio's van Europa behoren. Dit wordt grotendeels verklaard door een hoge bevolkingsdichtheid gepaard aan een sterke mobiliteit en hoge mate van industrialisatie.

Binnen Europa ziet men eigenlijk alleen in de Po-vlakte een vergelijkbare situatie, al is de gemiddelde NO_2 kolom daar aanmerkelijk lager dan boven Nederland. In Nederland wordt de

luchtkwaliteit in de gaten gehouden door het landelijk meetnet van het RIVM, waarbij op een groot aantal plaatsen in Nederland ozon, NO_x, fijn stof en andere gassen worden gemeten. De laatste tien jaar laat een dalende trend zien in NO_x, maar de nieuwe gezondheidsnorm van de Europese Commissie voor de jaargemiddelde NO₂ concentratie (40 µg/m³) wordt nu nog steeds overschreden in stedelijke gebieden langs snelwegen.



Figuur 3. Gemiddelde troposferische NO₂ kolom in 1996 zoals afgeleid uit GOME metingen voor China. Merk op dat GOME metingen (320 km x 40 km) grofmaziger zijn dan de SCIAMACHY metingen (60 km x 30 km) in figuur 1 en figuur 2.



Figuur 4. Als figuur 3, maar nu voor 2001. Merk op dat de 'vlek' rondom Beijing (vroeger Peking) zowel in omvang is toegenomen, als 'donkerder' is geworden ten teken van de sterke toename van lucht-vervuiling door stikstofoxiden in China.

Het nieuwe van de satellietmetingen is dat we de stikstofdioxideconcentraties boven Nederland direct kunnen vergelijken met andere gebieden (zoals de Po-vlakte). De laatste jaren maakt met name China een stormachtige economische ontwikkeling door. Dit is goed te zien in de NO₂ metingen van GOME (zie figuur 3 en 4). Deze metingen laten een sterke toename van de hoeveelheid NO_x zien boven China zien. Voorlopige schattingen duiden op een toename van om en nabij de 10% per jaar, maar er bestaan nog belangrijke onzekerheden. De ontwikkelingen in China zullen uiteindelijk ook effect hebben op de achtergrondconcentraties van ozon in Europa. Weliswaar hebben stikstofoxiden maar een korte levensduur, het door NO_x geproduceerde ozon leeft veel langer en kan zich derhalve verder verspreiden.

Satellietwaarnemingen van luchtkwaliteit

Satellietwaarnemingen van de samenstelling van de atmosfeer - gassen en deeltjes (aërosolen of fijn stof) - zijn niet meer weg te denken. Satellietmetingen worden al decennia lang gebruikt voor de weersverwachting. Maar ozon in de stratosfeer tussen 15 en 50 km hoogte wordt pas vanaf 1979 met satellietinstrumenten gemeten. Zonder satellietwaarnemingen zou het huidige wetenschappelijke inzicht in de ozonafbraak problematiek niet zo'n vaart genomen hebben.

De beschikbaarheid van satellietmetingen van gassen in het onderste deel van de atmosfeer is veel recenter. De stikstofdioxide metingen van SCIAMACHY (vanaf 2002) en zijn voorloper GOME (vanaf 1995) zijn uniek. Uniek omdat beide instrumenten spectrometers zijn die het door de atmosfeer weerkaatste zonlicht over een breed spectraal bereik meten. Zo kan er spectroscopie bedreven worden, een techniek die gebruik maakt van kennis van het absorberend vermogen van bepaalde gassen. In een laboratorium op de grond wordt de spectrale 'vingerafdruk' van een gas exact bepaald: deze vingerafdruk geeft aan bij welke kleur (golflengte) licht het gas sterker dan wel minder sterk absorbeert. De spectrale 'vingerafdruk' wordt vervolgens vergeleken met het spectrum dat door de satelliet gemeten is. Hoe meer er van een bepaald gas in de atmosfeer aanwezig is, hoe duidelijker de spectrale 'vingerafdruk' van dat gas terug te vinden is in de satellietmetingen.



Figuur 5. Impressie van de Europese milieusatelliet ENVISAT in zijn baan om de aarde. Goed te zien is hoe zonlicht dat door de atmosfeer, het oppervlak, en de wolken weerkaatst is aankomt bij de satelliet. De impressie laat "zichtbaar" licht zien, d.w.z. een astronaut zou dit beeld zien als hij bovenop ENVISAT zou zitten. De NO_2 'vingerafdruk' wordt ook gemeten in het zichtbare deel van het spectrum. De impressie laat met andere woorden ook goed zien hoe gevoeligheden in de NO_2 meetmethode verschillen voor bewolkte en onbewolkte scenes.

De absorptie zoals bepaald met de spectroscopische methode betreft de absorptie langs een schuin pad: de lichtdeeltjes die uiteindelijk bij de satelliet aankomen hebben een lange reis afgelegd van de zon door de atmosfeer en zijn uiteindelijk verstrooid aan het aardoppervlak, aan een wolk, of aan een luchtmolecuul, in de richting van de satelliet. Een en ander wordt geïllustreerd aan de hand van figuur 5, die een impressie geeft van ENVISAT in zijn baan op

700 km hoogte. Het precies bepalen van de gemiddelde weglengte van alle lichtdeeltjes (het schuine pad) is de grootste uitdaging bij het berekenen van de hoeveelheid luchtvervuiling door NO₂. Wat onze kaart immers aangeeft is de verticale kolom, d.w.z. de geschatte hoeveelheid NO₂ in een kolom lucht recht boven een bepaalde locatie. Voor het omzetten van de schuine kolom in de verticale kolom is heel nauwkeurige kennis nodig van de eigenschappen van de atmosfeer ten tijde van de meting. Hoe bewolkt was het? Hoe hoog zit een eventuele wolk? Lag er sneeuw of ijs? Hoe hoog bevinden de stikstofoxiden zich?

De detectielimiet voor de totale hoeveelheid NO₂ in de troposfeer is $2-4 \times 10^{14}$ molekulen per vierkante centimeter, terwijl de hoge waarden rond de $2-3 \times 10^{16}$ liggen. Het dynamische bereik is hiermee ongeveer een factor 100 (zie figuur 1). SCIAMACHY meet de troposferische NO₂ kolom voor gebieden van 30 bij 60 km, en heeft 6 dagen nodig om de hele wereld te bedekken. Omdat bewolkte gebieden niet bruikbaar zijn komt dit in de praktijk neer op 1x per maand een nieuwe kaart van de mondiale stikstofdioxideverdeling.

De toekomst

De kaarten van luchtvervuiling zien er natuurlijk fraai uit, maar wat kun je ermee doen? Behalve wetenschappelijk onderzoek naar de veranderende atmosfeer, kunnen de metingen gebruikt worden voor een nieuw type weersverwachting: het chemische weerbericht. Er bestaat de laatste jaren toenemende belangstelling voor actuele gegevens van luchtvervuiling die gebruikt kunnen worden voor het maken van een luchtkwaliteitsverwachting. Deze belangstelling heeft alles te maken de toenemende bezorgdheid over de luchtkwaliteit. Enerzijds nemen emissies van stikstof- en zwaveloxiden in Nederland niet meer af, en anderzijds wordt een toename verwacht van intercontinentaal transport van luchtvervuiling. Kort gezegd komt het erop neer dat achtergrond concentraties van ozon in Nederland in de nabije toekomst kunnen toenemen o.a. door ozontransport vanaf de Oostkust van de Verenigde Staten en vanaf Azië. Uitbreiding van de weersverwachting met een luchtkwaliteitscomponent (o.a. ozon) is met name van belang voor de volksgezondheid en voor de landbouw.

Een luchtkwaliteitsverwachting wordt gemaakt door informatie uit verschillende bronnen te combineren. De metingen van het landelijk meetnet luchtkwaliteit van het RIVM geven informatie over de actuele toestand van de luchtkwaliteit op neusniveau. De satellietmetingen van het KNMI geven daarnaast aan of de wind grote hoeveelheden luchtvervuiling in de richting van Nederland blaast. Beide types meetgegevens worden vervolgens gecombineerd met voorspellingen van luchtstromingen uit weermodellen om na te gaan hoe de vervuiling zich zal ontwikkelen. Het uiteindelijke doel is het leveren van een betrouwbare 24-uurs voorspelling van de luchtkwaliteit. Op dit moment is zo'n systeem nog in de ontwikkelfase en zijn de satellietmetingen van SCIAMACHY nogal schaars (hooguit eens in de 6 dagen) om het kortlevende stikstofdioxide gas goed te volgen. Maar op 15 juli 2004 is het Ozone Monitoring Instrument (OMI), een Nederlands-Fins instrument aan boord van een Amerikaanse satelliet, in een baan om de aarde gebracht. Dit instrument werkt met dezelfde principes als GOME en SCIAMACHY, en is in staat om niet alleen veel meer detail te zien (pixels zijn 24 km x 13 km), maar ook om elke dag een meting te doen van elke locatie op aarde. Daarmee is OMI een enorme stap vooruit om het gedrag van luchtvervuiling te karakteriseren.

Websites

Het TEMIS project: <http://www.temis.nl>

ESA bericht over SCIAMACHY metingen: <http://www.esa.int>

Landelijk meetnet luchtkwaliteit van het RIVM: <http://www.lml.rivm.nl>

Environmental Protection Agency (EPA), VS, <http://www.epa.gov>

Het Ozone Monitoring Instrument: www.knmi.nl/omi