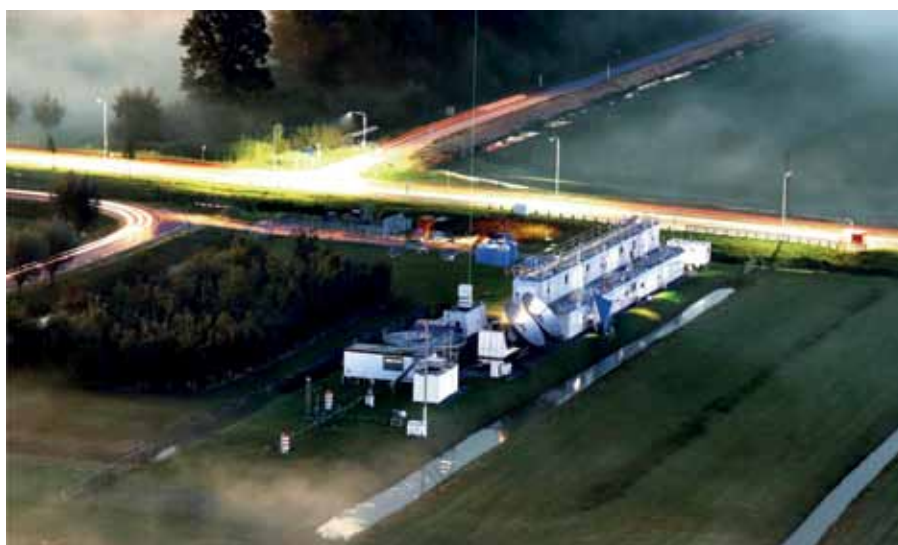


INTERNATIONALE VALIDATIE EN GEBRUIK VAN SATELLIET- GEGEVENS VOOR LUCHTKWALITEIT

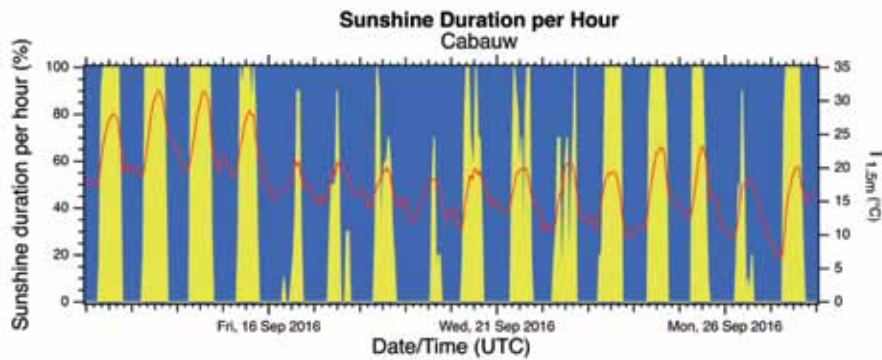
Onderzoekers uit de hele wereld kwamen afgelopen nazomer naar Cabauw om hun instrumenten voor luchtkwaliteit te vergelijken. Aanleiding was de voorbereiding van de validatie van het nieuwe satellietinstrument TROPOMI voor monitoring van luchtkwaliteit dat in 2017 wordt gelanceerd. Eenmaal terug zullen de instrumenten over de wereld grondmetingen uitvoeren als referentie voor de satellietmetingen.



Figuur 1: De tijdelijke opstelling van de CINDI-2 instrumenten op de zogenaamde Remote Sensing Site van het CESAR meetterrein bij Cabauw. CESAR staat voor Cabauw Experimental Site for Atmospheric Research. (Foto: Jarno Verhoef.)

ARNOUD APITULEY'

CINDI-2 is de tweede 'Cabauw Intercomparison of Nitrogen Dioxide Measuring Instruments', waarbij onderzoekers naar Cabauw komen om hun luchtverontreiniging metende instrumenten met elkaar te vergelijken. Deze instrumenten zullen op hun beurt, eenmaal terug op hun eigen plaats in de wereld, een rol spelen als referentie voor satellietinstrumenten die vanuit de ruimte luchtverontreiniging meten. CINDI-2 is daarom een belangrijke stap voor de validatie van TROPOMI, een satellietinstrument van Nederlandse makelij waarvan de lancering in 2017 wordt verwacht. De verwachtingen zijn hoog: TROPOMI moet de luchtkwaliteit vanuit de ruimte gaan meten op stads-



Figuur 2: Het percentage zonnenschijn per uur (geel) gedurende het belangrijkste deel van de intercomparison; de periode 12-28 september 2016. In rood is de temperatuur aangegeven. Gemiddeld over het land scheen de zon 217 uren tegen een langjarig gemiddelde van 143 uren. September 2016 behoort daarmee tot de zonnigste septembermaanden sinds het begin van de waarnemingen. (Bron: KNMI.)

niveau (zie kader TROPOMI).

Door het uitzonderlijk fraaie najaarsweer hebben de onderzoekers van het CINDI-2 meetproject een meer dan goede campagne gehad. De grootste groep deelnemende instrumenten, MAXDOAS, maakt namelijk gebruik van zonlicht. Ook de overige instrumenten bij de KNMI-meetmast Cabauw, die het gedetailleerde 'decor van de voorstelling' vormen – lidars, radiosondes, meetauto's, meetfietsen en metingen van fijn stof – hebben allemaal goed gewerkt. De campagne die duurde van 1 september tot 28 september heeft een aantal 'golden days' opgeleverd die het meest interessant zijn om te analyseren.

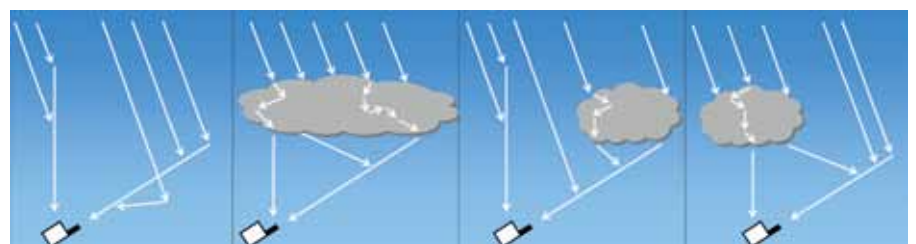
Het internationale meetproject CINDI-2 is wereldwijd het grootste meetproject in zijn soort. Zo'n honderd onderzoekers uit alle uithoeken van de wereld waren in september aan het werk op het terrein rond de KNMI-meetmast in Cabauw nabij Lopik.

CINDI-2 ging op 12 september bij de KNMI-meetmast in Cabauw van start met een feestelijke bijeenkomst voor alle betrokkenen. In zijn openingswoord benadrukte KNMI-hoofddirecteur Gerard van der Steenhoven dat een project als CINDI-2 door jonge onderzoekers misschien als een evenement op zich wordt gezien, maar dat het belangrijk is om ook het bredere perspectief te zien. Vooropstaat het belang van data van bekende kwaliteit voor toepassingen in weer, klimaat en luchtkwaliteit, op de lange termijn. Dit werd nog eens onderstreept door

Thorsten Fehr van de ruimtevaartorganisatie ESA die duidelijk maakte hoe groot de behoefte is aan een goede wereldwijde validatie van satellietinstrumenten vanaf de grond. Om validatie van satellietmetingen op de lange termijn zeker te stellen wil de Europese Ruimtevaartorganisatie ESA een netwerk van referentie-instrumenten voor het meten van de luchtkwaliteit tot stand brengen. CINDI-2 is hierin een belangrijke stap.

Metingen met licht

Bij de meetmast waren twintig containers opgesteld met meetapparatuur erop en erin. Hier konden de meer dan dertig deelnemende instituten hun metingen uitvoeren. De zogenaamde MAXDOAS-instrumenten waar het grootste deel van de campagne om draait, analyseren zonlicht dat door de in de atmosfeer aanwezige stoffen, zoals stikstofdioxide, wordt beïnvloed. Stikstofdioxide is net als fijn stof een belangrijke component van luchtvervuiling.

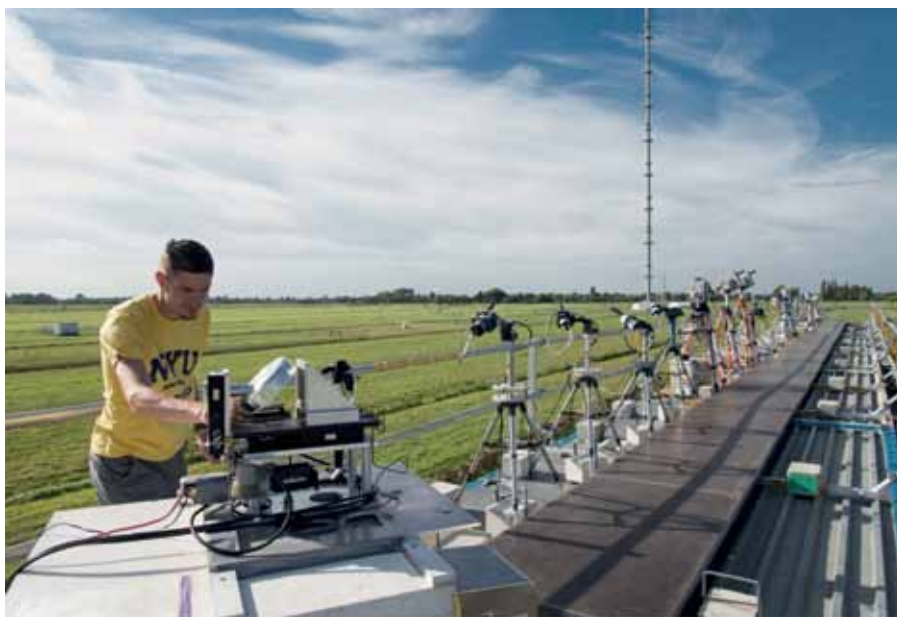


Figuur 3: Schematisch overzicht van een aantal mogelijke paden voor het licht van de zon om naar een MAXDOAS-instrument te komen. Door de aanwezigheid of juist afwezigheid van bewolking, maar ook stofdeeltjes worden de lichtpaden beïnvloed. In het geval er geen wolken zijn, maar veel stof dichtbij de grond, zal het lichtpad voor een belangrijk deel door het stof dichtbij de grond worden bepaald. Het is dus belangrijk om informatie te hebben over de bewolking en stofdeeltjes, en hoe hoog boven de grond die zich bevinden. (Bron: Vlemmix et al., Atmos. Chem. Phys., 15, 1313-1330, 2015.)

De DOAS-techniek, Differential Optical Absorption, vergelijkt een bekend, onverstoord spectrum (van de zon of van een lamp) met het licht dat door de atmosfeer is gegaan. Doordat elk gas in de atmosfeer een specifiek absorptiespectrum heeft, is het mogelijk de aanwezigheid van die gassen in het ontvangen spectrum te herkennen en de concentratie ervan te meten. Omdat het lichtpad door de atmosfeer van de lichtbron naar het instrument vele variaties kent, meet het DOAS-instrument onder verschillende hoeken (multi-axis) om zo meer informatie te verzamelen over het lichtpad.

De analyse van de metingen is behoorlijk ingewikkeld en gedetailleerde aanvullende informatie afkomstig van de meetapparatuur in Cabauw helpen de wetenschappers bij het begrijpen van de uitkomsten van de MAXDOAS-instrumenten.

Zo is de aanwezigheid van fijn stof, en vooral de hoogte waar het stof zich bevindt van belang om te kennen. Dat wordt gemeten met lidar-instrumenten die laserlicht gebruiken in plaats van zonlicht. Lidar staat voor 'Light Detection and Ranging'. Een laser geeft korte lichtflitsen die verticaal de lucht in gestuurd worden. Het licht reflecteert aan stofdeeltjes en wolkendruppels, waarna lichtgevoelige apparatuur het teruggekaatste licht opvangt. Uit de tijd die verstrijkt tussen het uitzenden van de lichtpuls en het moment waarop het teruggekaatste signaal binnenkomt, kan de hoogte van een stoflaag of van bewolking worden gemeten. De sterkte van het teruggekaatste signaal biedt informatie over de hoeveelheid stof in de lucht.



Figuur 4: Een onderzoeker stelt zijn instrument bij op het dak van de CINDI-2 opstelling. (Foto: Michel van Roozendaal.)

Instrumentvergelijking

Voor de instrumentvergelijking, of intercomparison, van de MAXDOAS-instrumenten, is een nauwgezet meet-schema, of protocol, opgezet. Een deel van de instrumenten heeft een vaste kijkrichting aan de horizon (azimut), en scant vanaf de horizon omhoog (elevatie), terwijl een ander deel van de instrumenten beide hoeken kan variëren (azimut en elevatie) en dus ook om zich heen staat te kijken. Van beide soorten waren meer dan vijftien exemplaren aanwezig, die allemaal enigszins anders in elkaar zitten. Omdat er zoveel verschillende instrumenten zijn met zoveel mogelijkheden, moest er een protocol opgesteld worden dat haalbaar was voor alle instrumenten. Sommige instrumenten hebben meer tijd nodig dan andere, bijvoorbeeld, om lang genoeg in een richting te meten en voldoende signaal te verzamelen, of om het instrument naar de juiste hoek te draaien. Het protocol was daarom complex en een uitdaging voor iedereen om zijn instrument correct te programmeren.

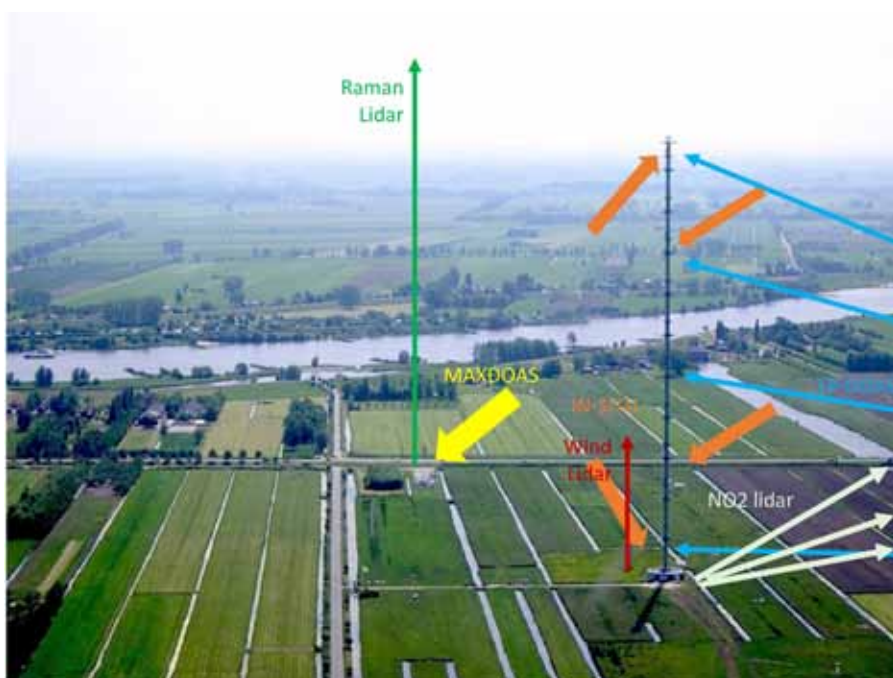
Tijdens de campagne leverden alle deelnemers 's ochtends anoniem hun resultaten van de vorige dag in aan de onafhankelijke referee die de resultaten beoordeelde. Het overzicht van de metingen werd iedere dag besproken. Dit zogenaamde 'semi-blind' protocol maakt het mogelijk dat duidelijke fouten gesignaleerd worden en dat deze verholpen konden worden. Een voorbeeld hiervan was de uitrichting van de

instrumenten naar hetzelfde punt aan de horizon die niet nauwkeurig genoeg bleek. Met behulp van een felle lamp op meer dan een kilometer afstand in het veld konden de kijkhoeken van de MAXDOAS-instrumenten goed afgesteld worden. Hierna verbeterde de overeenkomst tussen de 42 MAXDOAS-instrumenten aanzienlijk. Over enkele maanden zijn de resultaten van de intercomparison volledig uitgewerkt en verwachten we die te publiceren – op tijd voor het gebruik van de instrumenten voor de validatie van TROPOMI.

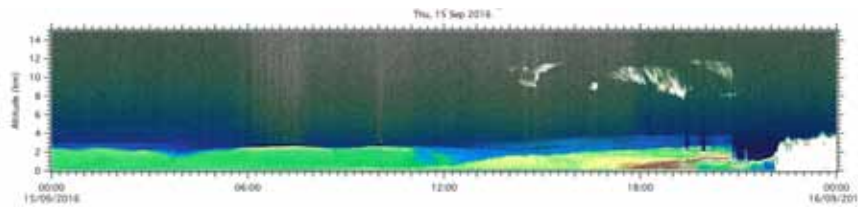
Wetenschappelijk inzicht

Doordat de MAXDOAS-techniek zonlicht gebruikt, neemt het licht waar dat op allerlei plaatsen in de atmosfeer verstrooid kan zijn. In de analyse wordt hier rekening mee gehouden, maar het blijft altijd moeilijk om het precieze lichtpad van de zon, door de atmosfeer naar het instrument te bepalen.

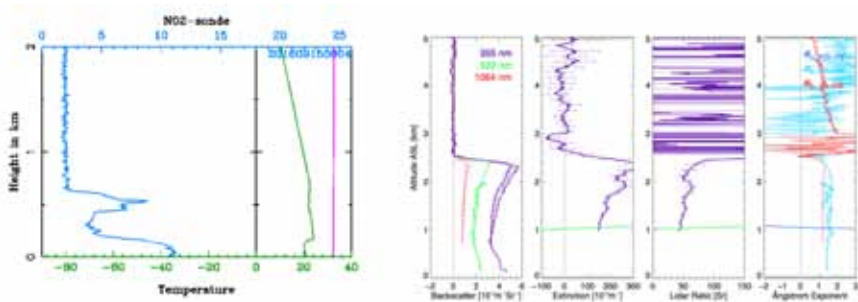
Omdat elk MAXDOAS-instrument een beetje anders is dan alle andere, bijvoorbeeld in de resolutie van het spectrum dat wordt opgenomen, of het golflengte-bereik, zal ook de verwerkingssoftware hier rekening mee moeten houden. Dit kan aanleiding geven tot verschillen in de waarnemingen zoals die uit de intercomparison komen. Dankzij de mogelijkheden van de unieke meetfaciliteit in Cabauw is er de mogelijkheid om de metingen van alle MAXDOAS-instrumenten tot in detail te bestuderen.



Figuur 5: Luchtopname van de CESAR site in Cabauw, met hierin globaal aangegeven waar de verschillende instrumenten zijn geplaatst tijdens de CINDI-2 campagne.



Figuur 6: Een lidar meting op 15 september. De bruine, groene en gele tinten geven de aanwezigheid van fijne stofdeeltjes aan, in de meting tot op ca. 2 km hoogte. De witte kleur geven wolken en neerslag aan. Blauw en zwart is vrijwel schone lucht, zonder stof of wolken. (Bron: KNMI.)



Figuur 7: Links: Verticaal profiel van NO₂, gemeten met een NO₂-sonde, opgelaten in Cabauw op 15 september om 8 uur (UTC). Het is te zien dat NO₂ zich niet alleen dicht bij de grond bevindt, maar ook op ca. 500 m hoogte. Dit is midden in de stoflaag in de lidar-meting. (Bron: KNMI.) Rechts: de optische eigenschappen van de stoflaag op 15 september om 8 uur (UTC) gemeten met de Raman lidar. (Bron:KNMI.)

In Cabauw, vlak bij Lopik, staat ook de meetmast van het KNMI. Deze meetmast heeft een hoogte van 213 meter. De mast wordt gebruikt voor meteorologische metingen in de onderste paar honderd meter van de atmosfeer, de grenslaag. Juist in die onderste meters spelen zich processen af die van groot belang zijn voor het weer en het klimaat. De meetmast Cabauw was begin jaren zeventig een van de eerste weerstations waarvan de gegevens automatisch in De Bilt worden ingezameld. Op verschillende hoogtes van de mast zijn instrumenten opgesteld voor metingen van temperatuur, wind, vochtigheid en straling. Op elke niveau zijn drie uithouders geïnstalleerd waarop de meetinstrumenten staan. Zo verkrijgt elke windrichting betrouwbare metingen. Ook op het terrein rond de meetmast is apparatuur, zoals stralingsmeters, opgesteld.

In de loop der jaren zijn er steeds meer remote sensing apparatuur bijgekomen, die met behulp van licht of radiogolven atmosferische parameters kunnen afleiden. Zo is er een wind-profiler die met radiogolven wind en temperatuur in de onderste kilometers van de atmosfeer meet. Ook zijn er radarsystemen die wolken en neerslag meten en lidar-systemen die met laserlicht nauwkeuring de aanwezigheid en eigenschappen van fijne stofdeeltjes meten. Al deze metingen hebben inmiddels veel

vruchten afgeworpen. Niet alleen voor de weersverwachtingen en de meteorologische begeleiding van de luchtvaart, maar ook voor onderzoek van klimaat en milieu. Het vulkaanstof van de IJslandse Eyjafjallajökull-vulkaan, die in het voorjaar van 2010 actief werd, is in de atmosfeer boven ons land het eerst gemeten met apparatuur opgesteld bij de meetmast Cabauw.

Regelmatig vormt de meetmast een podium voor onderzoekers uit de hele

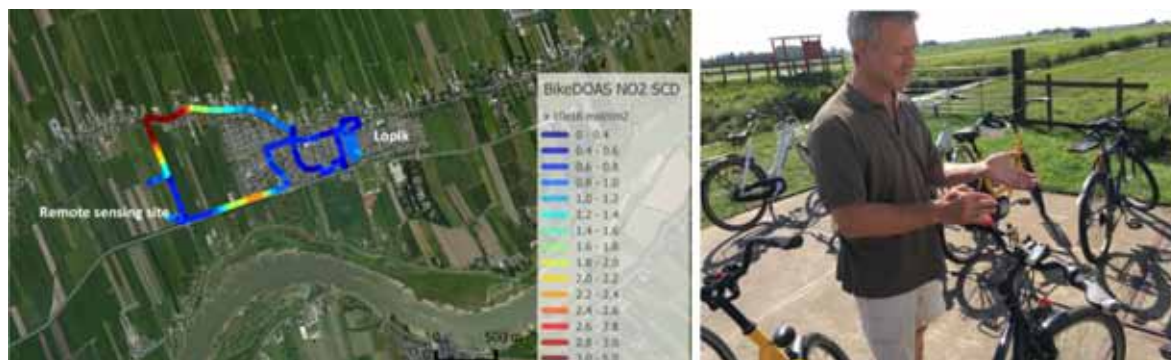
wereld. Een mijlpaal was begin deze eeuw een grootschalige wolkenmeetcampagne voor onderzoek naar de rol van wolken in het klimaat. Sindsdien hebben verschillende internationale meetcampagnes plaatsgevonden.

In 2002 is de samenwerking rond de meetmast Cabauw omgedoopt tot een 'nationaal observatorium van de atmosfeer' onder de naam Cabauw Experimental Site for Atmospheric Research (CESAR). Binnen CESAR werken KNMI, TU-Delft, RIVM, TNO, Universiteit Utrecht, ECN, Wageningen Universiteit en Research en het technologiecentrum ESTEC van de Europese ruimtevaartorganisatie ESA nauw samen. De mast biedt een internationaal platform voor het testen van nieuwe meetmethoden, modellen voor het beschrijven van weer en klimaat en satellietmetingen.

Om het verticale profiel van de atmosfeer te bepalen zijn de lidar-



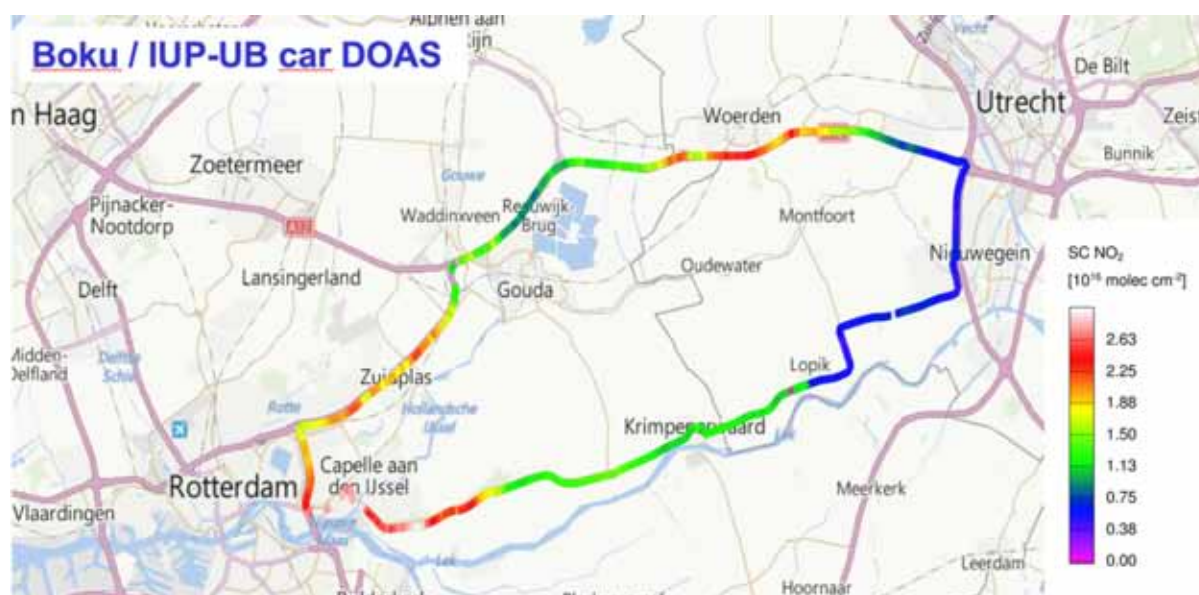
Figuur 8: De deelnemers aan de CINDI-2 meetcampagne.



Figuur 9: Voorbeeld van metingen in de nabije omgeving van Cabauw met een min of meer recht omhoog kijkende DOAS die op een fiets was gemonteerd. Verschillen in NO_2 zijn duidelijk zichtbaar. (Bron: BIRA.)



Figuur 10: Voorbeeld van metingen in de nabije omgeving van Cabauw met een NO_2 -sonde die in een bakfiets werd vervoerd. De sonde werkt met een speciale vloeistof (zie *Tijdschrift Lucht* nr. 4/5 2016) en is meet alleen de NO_2 die zeer lokaal (in situ) aanwezig is. Ook hier zijn duidelijk de ruimtelijke verschillen te zien. (Bron: KNMI.)



Figuur 11: Voorbeeld van mobiele DOAS-metingen die in de iets ruimere omgeving tussen Rotterdam en Utrecht zijn gedaan met een rondrijdende auto. Het ruimtelijke beeld omvat een aantal pixels zoals die door TROPOMI zullen worden waargenomen. (Bron: Boku/IUP-Bremen.)

instrumenten van belang. Die meten met korte lichtpulsen uit een laser hoe hoog boven de grond wolken en stofdeeltjes zich bevinden. Ook is er informatie over de grootte van de deeltjes af te leiden als er meerdere kleuren laserlicht worden gebruikt. Verder is het vanuit het oogpunt van de MAXDOAS van belang om te weten wat de lichtverstrooiingseigenschappen van de

stofdeeltjes zijn. Dit kan gemeten worden met een zogenaamde Raman lidar.

De onderzoekers maakten van de gelegenheid gebruik om extra aandacht te besteden aan de waarnemingen van de eigenschappen van fijnstof die van invloed zijn op de MAXDOAS-gegevens. Onderzoekers van het project ACTRIS (Aerosol, Clouds and Trace Gases

Infrastructure) plaatsen speciale apparatuur in Cabauw om te zien hoeveel licht het fijnstof absorbeert.

Al deze metingen geven een zeer compleet beeld van alle factoren die invloed hebben op de MAXDOAS-metingen en vormen samen een dataset waar de onderzoekers de komende tijd grondig werk mee kunnen verrichten.

Ruimtelijk beeld

Hoewel het geen hoofddoel was om tijdens CINDI-2 satellietmetingen te valideren, zijn er ook metingen gedaan om ruimtelijke variaties van de NO₂-concentraties in kaart te brengen. Hiervoor zijn innovatieve instrumenten gebruikt, zoals een klein DOAS-instrument dat op een fiets was gemonteerd. Ook de NO₂-sonde, die normaal aan een ballon wordt opgelaten, is per fiets in de omgeving gebruikt om NO₂ te karteren. Verder zijn er een aantal auto's uitgerust met DOAS-instrumenten die de wat ruimere omgeving van Cabauw hebben verkend. Met de auto's konden gebieden in kaart worden gebracht die overeenkomen met een aantal pixels (beeldelementen) die straks van TROPOMI verwacht kunnen worden.

Kleinere sensoren voor meten luchtkwaliteit

De meetcampagne is een unieke gelegenheid om te kijken hoe de laatste ontwikkelingen op het gebied van kleine en goedkope sensoren voor luchtkwaliteit zich gedragen ten opzichte van al die geavanceerde apparatuur. De verwachting is dat kleine en goedkopere sensoren op den duur een aanvullende rol kunnen gaan spelen bij het meten en modelleren van luchtkwaliteit op lokale schaal, binnen de stad.

Conclusies

Door het uitzonderlijk mooie weer in de maand september van 2016 is het mogelijk geweest voor een groep van circa honderd onderzoekers uit de hele wereld om in Cabauw een uitstekende dataset te verzamelen voor vergelijking

van instrumenten die het in de toekomst mogelijk maken om de nieuwe satelliet voor meting van de chemische samenstelling van de atmosfeer TROPOMI te valideren.

Het CINDI-2 meetproject verbindt metingen van luchtkwaliteit met satellieten met metingen op de grond, samen met de nieuwste ontwikkelingen voor metingen van luchtkwaliteit op de kleinste schaal die nu mogelijk is.

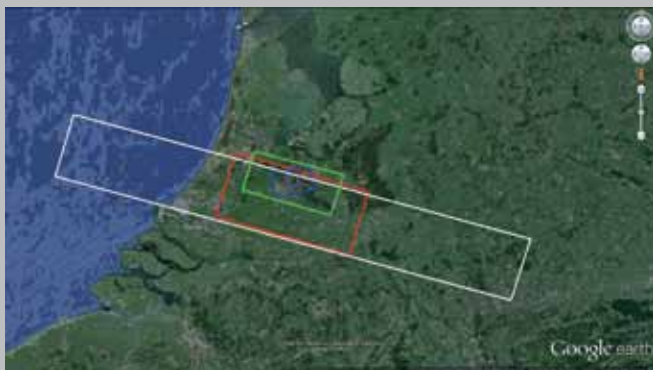
Links

- <http://www.cesar-observatory.nl>
- <http://www.tropomi.eu>
- <http://projects.knmi.nl/cindi-2>
- <http://www.actris.eu>

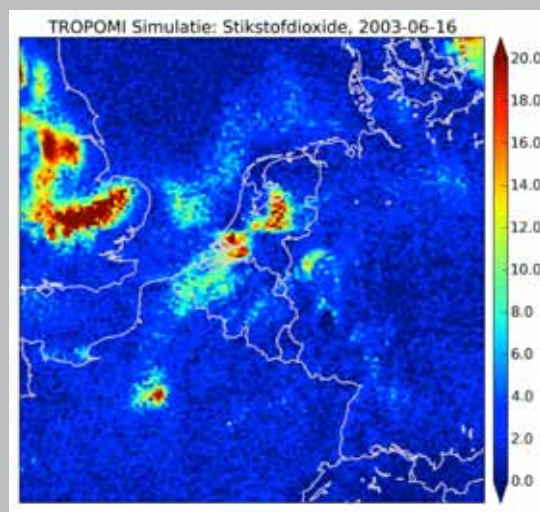
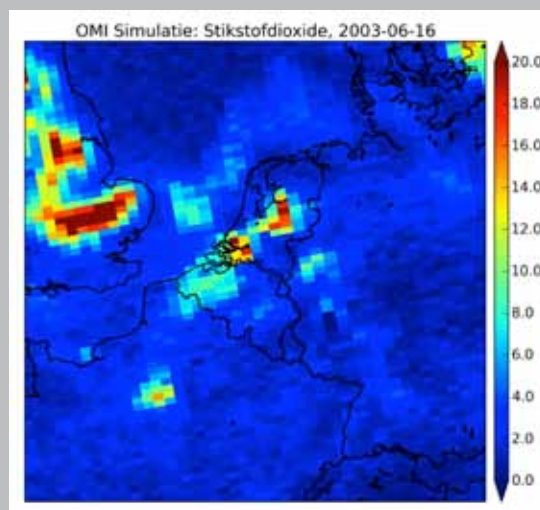
* Arnaud Apituley is werkzaam bij het KNMI.

TROPOMI

Het TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) is het instrument aan boord van de Copernicus Sentinel-5 Precursor satelliet. Sentinel-5 Precursor is de eerste Sentinel voor atmosferische samenstelling en wordt in 2017 gelanceerd. De missie duurt zeven jaar. De baan van TROPOMI bevindt zich op 824 kilometer boven de aarde. Van hieruit kan het instrument elke dag opnieuw de hele atmosfeer in kaart brengen met details van maximaal 3.5 bij 3.5 kilometer. Deze hoge resolutie maakt het mogelijk om luchtvervuiling te detecteren op stadsniveau. Om NO₂ te meten gebruikt TROPOMI technieken die sterk lijken op het MAXDOAS-principe; het detecteert via een aantal stappen licht dat weerkaatst wordt door de dampkring en vergelijkt dit met licht direct van de zon. In het verschil tussen deze twee lichtbronnen zit belangrijke informatie verscholen over de samenstelling van onze atmosfeer.



Figuur 12: De resolutie van TROPOMI (paars) is vele malen beter dan die van zijn voorgangers. GOME, 1995 (wit), SCIAMACHY, 2002 (rood), GOME-2, 2006 (groen), OMI, 2004 (blauw). (Bron: KNMI.)



Figuur 13: Simulaties van het ISOTROP-project om aan te geven wat de te verwachten verbeterde resolutie van TROPOMI NO₂-metingen op zal leveren (onder) ten opzichte van zijn voorganger OMI (boven). (Bron: ISOTROP)