

# Het internationaal meetproject CINDI-2



Figuur 1: (MAX-)DOAS-instrumenten naast elkaar opgesteld op het dak van het tijdelijke containerdorp.

Frederik Tack,  
Gaia Pinardi,  
Jeroen van Gent,  
François Hendrick en  
Michel Van Roozendaal

**De grote invloed van menselijke activiteit op de samenstelling van de aardatmosfeer en de hieraan gerelateerde veranderingen van onze omgeving en het klimaat leiden in toenemende mate tot bezorgdheid bij de bevolking. Dit motiveert de ontwikkeling van een globaal systeem, bestaande uit instrumenten die de aarde nauwlettend in de gaten houden op basis van grondstations, vanuit de lucht met drones en vliegtuigen, en met satellietssystemen vanuit de ruimte. De observaties van deze instrumenten zijn cruciaal om de gevolgen in te schatten van huidige en toekomstige menselijke activiteit en van veranderingen in het klimaatbeleid. Ze zijn ook noodzakelijk voor de validatie van modellen die de atmosfeer simuleren en toekomstige scenario's voorspellen.**

Het Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie (BIRA) draagt reeds meer dan 20 jaar bij aan de ontwikkeling van een dergelijk observatiesysteem door o.a. de nauwe betrokkenheid bij de opeenvolgende satellietmissies van het Europees ruimtevaartagentschap (ESA) voor de observatie van de atmosfeer van de aarde (bijv. GOME en SCIAMACHY). BIRA maakt deel uit van een internationaal team dat de toekomstige satellieten Sentinel 4, 5 en 5P ontwikkelt die een reeks van vervuilende stoffen in de atmosfeer zullen monitoren. De Sentinel-familie ondersteunt COPERNICUS, een ambitieus programma van de Europese Commissie om veranderingen op aarde (op het land, op zee en in de lucht) nauwkeurig in kaart te brengen.

## **Remote sensing DOAS-techniek en in-situmetingen: zien en ruiken**

De DOAS-techniek bestaat uit het bestuderen van de lichtintensiteit als functie van golflengte, kortom: van het lichtspectrum. Als licht door een gasachtig medium (zoals de atmosfeer) beweegt, verandert het spectrum onder invloed van absorptie door de aanwezige moleculen. Elke chemische stof absorbeert het licht op een specifieke manier, wat men de spectrale signatuur noemt, en elke stof laat zo een digitale vingerafdruk na in het lichtspectrum. Het verschil in lichtintensiteit tussen golflengten waar een molecule sterk absorbeert en die waar de absorptie zwak is maakt het mogelijk om de concentratie ervan te bepalen.

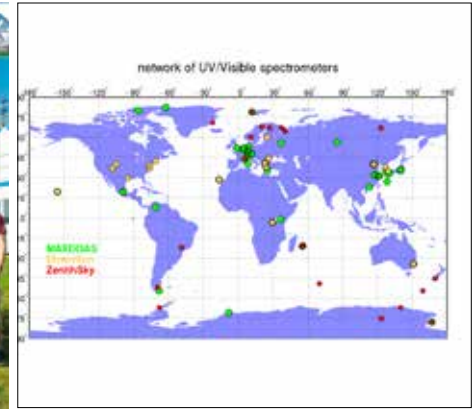
Toegepast op het spectrum van het zonlicht, dat door de atmosfeer wordt verstrooid, kan met behulp van DOAS de atmosferische kolom van een gas (concentratie geïntegreerd in verticale richting), zoals  $\text{NO}_2$ , bepaald worden. Deze kolom kan worden gezien als de dikte van de gaslaag in de atmosfeer. Aangezien de gemeten grootte (in dit geval de  $\text{NO}_2$ -kolom) niet direct in contact staat met het meetinstrument, wordt gesproken van afstandsmetingen of remote sensing. In-situ-instrumenten daarentegen berusten op een chemische analyse van monsters genomen van de lucht die in direct contact staat met het meetstation. Om een analogie te maken met de menselijke zintuigen: afstandsmetingen kunnen vergeleken worden met het gezichtsvermogen en de in-situmetingen met reukzin.



Figuur 2: Mozaïek van verschillende types (MAX-)DOAS-instrumenten die tijdens CINDI met elkaar worden vergeleken. © A. Piters, KNMI



Figuur 3: Groepsfoto en CINDI-2 campagnelogo. Het tijdelijke containerdorp in Cabauw, Nederland en de 213 meter hoge KNMI-meetmast zijn op de achtergrond te zien.



Figuur 4: Weergave van de locatie van DOAS-stations op aarde, geassocieerd volgens meettype.

De calibratie en validatie van de satellietobservaties steunen op referentiedata, verzameld door grondstations die deel uitmaken van internationale netwerken zoals NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change). Het is belangrijk dat deze instrumenten op geregelde tijdstippen onderling vergeleken worden met elkaar om de kwaliteit en de consistentie van de referentiedata te garanderen; temeer omdat elk instrument door zijn eigen universiteit of instituut werd ontwikkeld en er ook verschillende algoritmes gehanteerd worden om de informatie af te leiden uit de metingen. Figuur 2 geeft een overzicht van de verschillende types instrumenten.

In deze context vond in september 2016 de internationale meetcampagne CINDI-2 (Second Cabauw Intercomparison Campaign for Nitrogen Dioxide measuring Instruments) plaats in Cabauw, Nederland. Een gelijkaardige campagne, CINDI-1, werd er reeds georganiseerd in 2009. CINDI-2 werd georganiseerd door het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) onder de wetenschappelijke coördinatie van het BIRA. Een groot aantal instrumenten van 26 wetenschappelijke instellingen uit 17 verschillende landen, heeft deelgenomen aan de campagne. Het gaat o.a. om verschillende types zogenaamde DOAS remote sensing instrumenten (Multi-AXis (MAX-), Mobile-, Imaging (I-), Cavity Enhanced (CE-), en Long-Path (LP-)

DOAS-spectrometers), waarbij DOAS staat voor Differentiële Optische Absorptie Spectroscopie (zie kader). Daarnaast werden er andere, ondersteunende, instrumenten ingezet, zoals in situ analysators, ballon-sondes, LIDAR, aerosol-meetinstrumenten, etc. De belangrijkste objectieven van de CINDI-2-campagne zijn: (1) het karakteriseren van de ruimtelijke en temporele variabiliteit van verschillende atmosferische pollutanten, met de focus op stikstofdioxide (zie kader over het belang van meten van  $\text{NO}_2$ ); (2) het onderzoeken van de nauwkeurigheid en precisie van een set van MAX-DOAS-instrumenten en de harmonisatie van deze toestellen. Deze instrumenten zijn opgesteld in verschillende meetstations verspreid over de wereld (figuur 4) en doen o.a. dienst voor validatie van satellietobservaties. Een dergelijke waarborg van de meetnauwkeurigheid van instrumenten vindt plaats door middel van een zogenaamde semi-blinde vergelijking (zie kader).

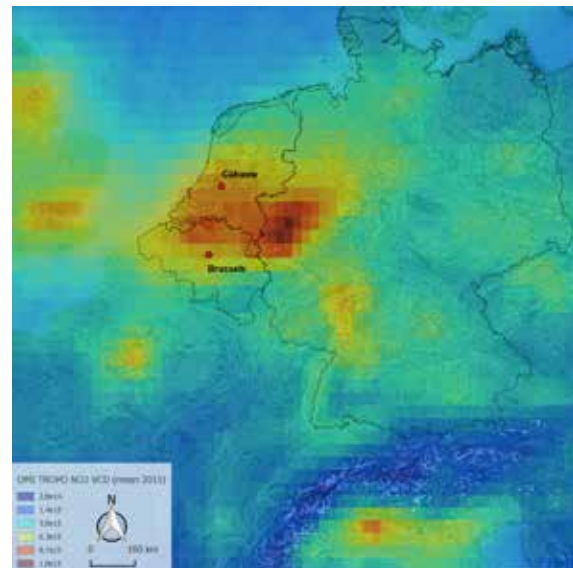
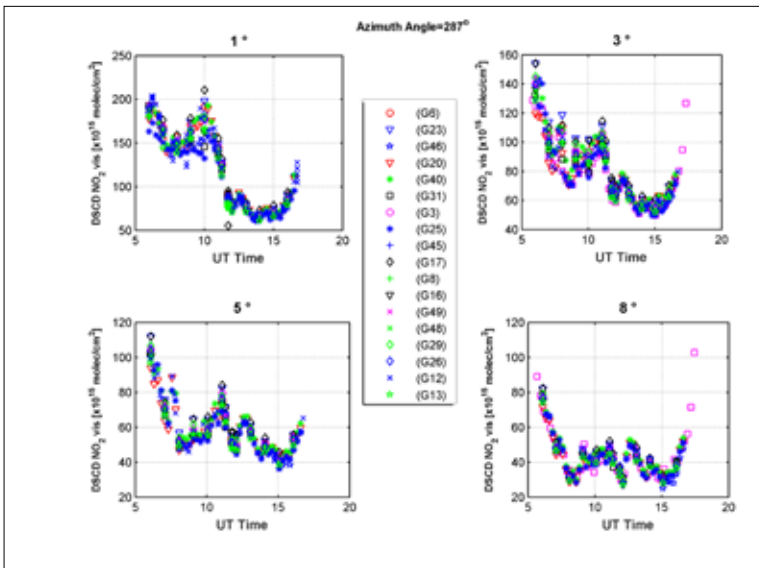
#### MAX-DOAS en validatie van satellietobservaties

Metingen van het type MAX-DOAS (zie kader over de DOAS-techniek) maken gebruik van een spectrometer en zijn gebaseerd op het kwantificeren van de specifieke absorptie van zonlicht door vervuilende stoffen, zoals stikstofdioxide ( $\text{NO}_2$ ), ozon ( $\text{O}_3$ ) of formaldehyde (HCHO). De mate van absorptie is een maat voor de dikte van de laag van deze stoffen in de atmosfeer.

#### Semi-blinde vergelijking van MAX-DOAS tijdens CINDI-2

Eén van de belangrijkste doeleinden van de CINDI-2-campagne is het vergelijken en onderzoeken van de verschillen van een set van MAX-DOAS-instrumenten en bij te dragen aan de harmonisatie van zowel de metingen als de algoritmes om concentraties van een bepaalde molecuul af te leiden. 'Semi-blind' betekent dat de meetresultaten worden aangeleverd aan een onafhankelijke scheidsrechter, die de verschillende datasets vergelijkt en tijdens een dagelijkse vergade-

ring de resultaten toont zonder vermelding van de naam van de verschillende instituten (zie figuur 5). De scheidsrechter communiceert dan met een bepaalde groep indien grote verschillen worden vastgesteld, zodanig dat eventuele problemen of foute instellingen kunnen worden opgespoord en bijgesteld. Op het einde van de semi-blinde fase, die doorgaans een 2-tal weken duurt, worden de namen van instituten toegekend aan de datasets en worden de gemiddelde verschillen van elke groep ten opzichte van een bepaald referentietoestel verder bestudeerd.



Figuur 5: Illustratie van de vergelijkende resultaten van MAX-DOAS  $\text{NO}_2$ -observaties onder verschillende kijkhoeken. Omwille van de zogenaamde semi-blinde vergelijking wordt aan elk instrument een code toegekend. Dit zijn de metingen voor één dag (24/09/2016).

Figuur 6: Kaart met de gemiddelde troposferische  $\text{NO}_2$ -waarden in West-Europa in 2015, waargenomen door het OMI-instrument. Het noorden van België en het zuiden van Nederland behoren tot de meest vervuilde regio's van Europa. Dit komt voornamelijk door de hoge bevolkingsdichtheid en het daaraan gerelateerde drukke verkeer. Ook waait er geregeld vervuiling over, afkomstig van zware industrie in het Ruhrgebied.

Om dit te bereiken verzamelt een MAX-DOAS-instrument zonlicht door een optische vezelkabel achtereenvolgens naar de horizon en naar het zenit te richten. In het geval van stikstofdioxide, kan op deze manier onderscheid worden gemaakt tussen het natuurlijk  $\text{NO}_2$  in de atmosfeer en de laag van  $\text{NO}_2$  gevormd door verkeer en industrie, dicht bij de grond. Bovendien meet de MAX-DOAS-techniek de hoeveelheid vervuiling in luchtmassa's die representatief is voor satellietmetingen; dat wil zeggen: met een vergelijkbare horizontale en verticale resolutie. Daarmee is de MAX-DOAS-techniek uitermate geschikt voor de validatie van satellietmetingen. Verder zijn deze instrumenten ook zeer geschikt om het verband vast te leggen tussen satellietmetingen en oppervlakteconcentraties van vervuilende gassen, gemeten door grondinstrumenten voor het monitoren van luchtkwaliteit (zoals uitgevoerd door IRCELCELINE in België).

Figuur 6 laat zien dat België tot de Europese landen behoort met een zeer sterke  $\text{NO}_2$ -vervuiling, samen met Nederland, Duitsland, het Londens bassin en de Po-vallei; gebieden met een grote bevolkingsdichtheid en druk verkeer. Satellietmetingen van vervuiling hebben het voordeel dat ze wereldwijde dekking bieden gedurende langere periodes (jaren), maar hun ruimtelijke resolutie is doorgaans beperkt (het OMI-instrument presteert momenteel het beste met pixels van  $12 \times 24 \text{ km}^2$ ). De verdeling van vervuilde lucht binnen een stedelijke agglomeratie kan daardoor niet worden vastgesteld, terwijl juist daar de vervuilende gassen in hogere concentraties voorkomen en de grootste invloed hebben op hun omgeving. Bovendien volgen satellieten meestal een zogenaamde heliosynchrone baan, waardoor ze een bepaald gebied op het aardoppervlak altijd op een vast tijdstip waarnemen. De dagelijkse variatie van  $\text{NO}_2$ -concentraties en de maxima tijdens ochtend- en avondspits zijn daardoor aan het oog van de satellieten

onttrokken. De nieuwe generatie satellieten zal daar verandering in brengen door o.a. een fijnere ruimtelijke resolutie en observaties vanuit een geostationaire baan: Sentinel-4 (te lanceren in 2021) zal continu Europa waarnemen, terwijl de Verenigde Staten zullen worden gemonitord door TEMPO en Azië door GEMS.

### Ondersteunende instrumenten en synergie met MAX-DOAS

$\text{NO}_2$ -concentraties kunnen sterk variëren in tijd en ruimte, zowel horizontaal als verticaal. Om de  $\text{NO}_2$ -distributie grondig te bestuderen, werden verschillende instrumenten gehanteerd tijdens CINDI-2, in samenwerking met de MAX-DOAS-instrumenten. Een kleine selectie van deze instrumenten, van zowel gerenommeerde types als meer experimenteel van aard, wordt geïllustreerd in figuur 7. Metingen met een compact DOAS-systeem, gemonteerd op een auto of fiets (figuur 8), kunnen bijvoorbeeld belangrijke informatie bieden over de horizontale  $\text{NO}_2$ -variabiliteit. Deze observaties zijn vervolgens vergeleken en gelinkt met horizontale scans uitgevoerd met de MAX-DOAS-instrumenten. Anderzijds bieden ballon-sondes en LIDAR-metingen belangrijke informatie over hoe de  $\text{NO}_2$  verticaal is verdeeld in de atmosfeer en ook dit kan worden vergeleken met de berekende MAX-DOAS-profielen. Dergelijke profielinformatie is essentieel om atmosferische  $\text{NO}_2$ -kolommen, zoals bijvoorbeeld geobserveerd door satellietensoren, om te zetten naar oppervlakteconcentraties. Deze laatste zijn sterk gekoppeld aan luchtkwaliteit in de strikte betekenis van het woord, aangezien mensen rechtstreeks worden blootgesteld aan vervuiling in de oppervlaktelaag van de atmosfeer. Verder werden verschillende in-situ-instrumenten opgesteld in de meetmast, en dit op verschillende hoogtes. Deze instrumenten 'ruiken' de lucht en meten zo lokale concentraties op directe wijze.



Figuur 7: Mozaïek van verschillende instrumenten die zijn ingezet tijdens CINDI-2. V.l.n.r., b.n.o.: BIRA MAX-DOAS, set van in situ analysators ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , etc.), BIRA BikeDOAS, BIRA Aeromobil, BIRA  $\text{NO}_2$ -sensor, KNMI  $\text{NO}_2$ -radiosonde, RIVM mobiele LIDAR.



Figuur 8: Kaart met  $\text{NO}_2$  kolommen rond de meet-site in Cabauw, gebaseerd op metingen met een compact DOAS-instrument, gemonteerd op een fiets.

### Het CESAR-observatorium

De CINDI-2-campagne vond plaats op de CESAR-site (Cabauw Experimental Site for Atmospheric research) in het westen van Nederland ( $51.971^\circ \text{ N}$ ,  $4.927^\circ \text{ E}$ ). Op deze locatie werd in 1970 een 213 meter hoge meetmast gebouwd voor meteorologisch en atmosferisch onderzoek. CESAR wordt gebruikt voor de langetermijnopvolging van variabiliteit en trends met betrekking tot atmosferische parameters en chemische bestanddelen. Andere belangrijke toepassingen zijn de validatie van satellietobservaties en het uittesten van nieuwe meettechnieken.

### Stikstofdioxide, een belangrijke vervuiler

Stikstofdioxide ( $\text{NO}_2$ ) is een atmosferisch sporengas en een belangrijke vervuiler die de nodige aandacht verdient: (1) vooreerst kan het gezien worden als een proxy voor luchtvervuiling in het algemeen, aangezien hoge concentraties  $\text{NO}_2$  vaak gepaard gaan met hoge concentraties van andere vervuilers; (2) recente studies uitgevoerd door de Wereldgezondheidsorganisatie, hebben uitgewezen dat blootstelling aan  $\text{NO}_2$  een direct effect kan hebben op de menselijke gezondheid; (3)  $\text{NO}_2$  draagt bij tot de vorming van aerosolen en troposferische ozon en heeft op die manier indirect een impact op het klimaat. Om deze redenen is het meten en in kaart brengen van  $\text{NO}_2$ -concentraties zeer relevant.  $\text{NO}_2$  wordt voornamelijk gevormd bij de verbranding van fossiele brandstoffen, gerelateerd aan industrie en verkeer. Het is een sporengas met een sterk lokaal karakter en het kan zeer variabel zijn in tijd en ruimte. In stedelijke gebieden worden Europese normen voor  $\text{NO}_2$ -concentraties bijvoorbeeld vaak overschreden. Figuur 6 laat zien dat het noorden van België en het zuiden van Nederland tot de meest vervuilde regio's van Europa behoren.

### De auteurs

Frederik Tack, Gaia Pinardi, Jeroen van Gent, François Hendrick en Michel Van Roozendael zijn onderzoekers aan het Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie (BIRA).

### Meer

Cabauw Experimental Site for Atmospheric Research (CESAR): <http://www.cesar-observatory.nl>  
 CINDI-2-campagne: <http://www.tropomi.eu/science/cindi-2>  
 UV-Vis DOAS-groep aan het BIRA: <http://uv-vis.aeronomie.be>  
 ESA: <http://www.esa.int>  
 ESA Sentinels: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Overview4](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4)  
 Netherlands Space Office (NSO): [www.spaceoffice.nl](http://www.spaceoffice.nl)  
 NDACC: <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/>  
 IRCEL/CELINE: <http://www.irceline.be>

### Dankwoord

CINDI-2 wordt gesteund door ESA (via de projecten FRM-4DOAS en CINDI-2) en het Nederlands ruimtevaartagentschap (NSO). Wij wensen uitdrukkelijk Arnoud Apituley en het volledige KNMI-team te bedanken voor de organisatie van CINDI-2, alsook onze collega's Alexis Merlaud, Caroline Fayt, Christian Hermans en Clio Gielen, en alle universiteiten en instituten die hebben deelgenomen.