

EMISSIONS METEN VANUIT DE RUIMTE

Satellietmetingen kunnen worden ingezet om wereldwijd onafhankelijke metingen te doen van de samenstelling van de atmosfeer. Dit gebeurt door ze in te zetten om naar absorptiepatronen te zoeken van gassen zoals CO₂, methaan en stikstofdioxide. Sinds een paar jaar is het zelfs mogelijk om van bepaalde gassen direct emissies te meten. Nu worden nog veel emissies geschat en niet direct gemeten. Op verschillende plaatsen wereldwijd wordt gewerkt aan nieuwe generaties satellietsystemen om emissies te meten op het detailniveau van een installatie. Deze kunnen klimaat- en milieubeleid ondersteunen en geven onderzoekers toegang tot emissiedata van betere kwaliteit.

Nieuw gereedschap

Het belang van aardobservatiesatellieten die de samenstelling van de atmosfeer meten is de laatste jaren enorm toegenomen vanwege de aandacht voor de schadelijke gevolgen van broeikasgassen, luchtvervuiling en stikstof. Internationale verdragen zoals het Parijs-klimaatakkoord vragen landen om deze emissies terug te dringen. Een grote uitdaging is dat veranderingen in de atmosferische samenstelling en de emissies die ze veroorzaken niet overal even gedetailleerd gemeten worden. In sommige delen van de wereld is deze informatie zelfs helemaal niet beschikbaar. Satellietinstrumenten bieden dan een interessant extra stuk meetgereedschap omdat ze een groot gebied kunnen bestrijken en een hoge mate van onderlinge vergelijkbaarheid hebben. De Europese Unie verwacht veel van deze toepassing en richt zich hierop voor de implementatie van haar Methaanstrategie en het Parijsakkoord. Nederlandse onderzoekers, kennisinstituten en ruimtevaartbedrijven hebben de afgelopen decennia een sterke kennispositie opgebouwd in het ontwikkelen en realiseren

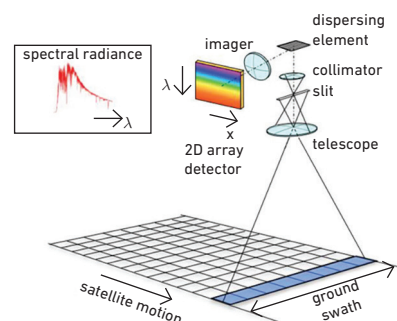
van satellietinstrumenten die zulke metingen doen aan de atmosfeer. Zo leverde Nederland een belangrijke bijdrage aan de satellietmissies GOME (gelanceerd in 1995) en SCHIAMACHY (2002) van de Europese ruimtevaartorganisatie ESA en ontwikkelde ze het OMI-instrument (2004) voor NASA. Dit is een bijzondere verdienste want Nederland is in absolute termen een kleine speler in de ruimtevaartwereld. In de jaren erna is deze kennispositie verder uitgebouwd en die voortgang heeft geleid tot de ontwikkeling van het TROPOMI-instrument. Het instrument is ontwikkeld door Airbus Defence and Space Nederland, KNMI, SRON en TNO, in opdracht van het Netherlands Space Office (NSO) en ESA. Het werd in 2017 gelanceerd en brengt op dagelijkse basis wereldwijd de broeikasgassen methaan en ozon, en vervuilende stoffen zoals stikstofdioxide en zwaveldioxide in kaart die zich in de atmosfeer bevinden.

TROPOMI

TROPOMI vliegt in een baan van zo'n achthonderd kilometer rond de aarde en wordt gebruikt om de samenstel-

ling van de atmosfeer te meten door in gereflecteerd zonlicht van de aarde naar absorptiepatronen van specifieke moleculen te zoeken. Belangrijke luchtvervuilers zoals stikstofdioxide en zwaveldioxide worden hierbij typisch gemeten in het zichtbare en ultraviolette deel van het lichtspectrum (UV-VIS), terwijl de broeikasgassen koolstofdioxide en methaan vooral in het infrarood gemeten worden (*short-wave infrared*, SWIR).

Het TROPOMI-instrument is een zogeheten *pushbroom*-instrument en bestaat uit vijf hoofdzakelijke onderdelen: een telescoop en vier spectrometers. De telescoop kijkt vanuit de satelliet permanent recht naar beneden – naar de aarde – en richt de instrumenten op een 2600 kilometer brede strook van het aardoppervlak (*swath*) waarin de metingen gedaan worden. Omdat het instrument om de aarde vliegt en de aarde onder het instrument doordraait, scant het als het ware het aardoppervlak af, zoals een bezem (*broom*) over de vloer. Op deze manier is het mogelijk om met TROPOMI vrijwel overal op aarde te meten, met uitzondering van de polen.



Figuur 1. Links: TROPOMI (illustratie: KNMI / ESA). Rechts: schematische werking [1] van de *pushbroom*-spectrometer zoals gebruikt in TROPOMI. Illustratie: ESA.

Elke swathmeting van TROPOMI bestaat uit kleinere gebieden ('pixels') die een voetafdruk van enkele kilometers hebben. Voor elke pixel bekijken vier spectrometers het licht in afzonderlijke banden: UV1 (270 - 300 nm), UV2-VIS (300 - 500 nm), NIR (675 - 775 nm) en SWIR (2305 - 2385 nm). Met tralies wordt het licht in de spectrometers gebroken. Zoals in de rechter illustratie in figuur 1 te zien is, wordt voor iedere meting het gebroken licht omgezet in een tweedimensionaal signaal.

Eén dimensie correspondeert met de pixels in de swath en de andere met de verschillende golflengtes. Uniek aan TROPOMI is dat in bovenstaande golflengtegebieden metingen gedaan worden met een hoge spectrale resolutie van 0,45 nm (UV-VIS-NIR) en 0,25 nm (SWIR) zodat de absorptiepatronen van verschillende gassen onderscheiden kunnen worden van elkaar en van verstoringen.

De instrumentdata van TROPOMI worden naar een grondstation op aarde gestuurd en verwerkt door algoritmes die door onderzoekers ontwikkeld zijn om de aanwezigheid van gassen te detecteren en te kwantificeren (voor meer informatie zie het artikel van Ilse Aben en Pepijn Veeffkind op pagina 18). Door verschillende metingen van het satellietinstrument naast elkaar te leggen ontstaat een concentratieveld dat laat zien hoe gassen verspreid zijn door de atmosfeer. Hierop kunnen dan weer de pluimen van emissies zichtbaar zijn en uit die pluimen kan de sterkte van de bron worden afgeleid, bijvoorbeeld met kennis van de lokale weersomstandigheden.

Zuinig zijn op licht

In het algemeen zijn er drie belangrijke parameters die bepalen hoe geschikt satellietinstrumenten zijn om metingen van broeikasgassen en luchtvervuiling te doen: hun spectrale nauwkeurigheid, het gebied dat ze kunnen bestrijken en het ruimtelijke detailniveau (pixelgrootte). Die laatste factor is bijvoorbeeld van belang als je emissies wilt opsporen of kwantificeren: hoe meer ruimtelijk detail een instrument kan zien, des te gemakkelijker het is om een bron te lokaliseren en hoe meer metingen je hebt om metingen te doen in de pluim van een bepaalde bron.

Idealiter zou je natuurlijk een combinatie van dit alles willen: een satellietinstrument dat nauwkeurig is, de hele aarde bestrijkt en dan ook nog eens in heel veel detail waarneemt. Helaas gaat dat in de praktijk niet. Dit komt omdat, hoe kleiner de pixel is waar een satelliet naar kijkt, hoe minder licht per pixel er wordt ingevangen – en hoe minder signaal er dus is om de spectroscopische meting te maken van dit stukje meetoppervlak. Ook zijn er bijvoorbeeld technologische grenzen aan detectoren waardoor je maar een beperkt aantal van die pixels kunt meten. Boven alles zijn er altijd beperkingen in kosten en volume die bepalen hoe groot of complex je een instrument kunt maken. Daarom is in de praktijk het ontwerp van een aardobservatie-instrument een optimalisatie van gebruikerswensen binnen vele technische, fysische en projectmatige randvoorwaarden. De belangrijkste verdienste van

TROPOMI is dat het wereldwijd een breed scala aan gassen kan meten, met een hoge nauwkeurigheid, met nog steeds een relatief hoge ruimtelijke resolutie. Dit is mogelijk omdat TROPOMI efficiënt omgaat met het waargenomen licht. Een goed voorbeeld hiervan is de telescoop van het instrument die bestaat uit aluminium gecoate spiegels. In een conventionele aanpak zou een telescoop met de gewenste ruimtelijke resolutie uit minstens drie spiegels bestaan. Echter vanwege het brede spectrale bereik is een reflectie van meer dan 90% per spiegel niet haalbaar. Om het lichtverlies van een extra spiegel te compenseren zou je instrument een kwart groter moeten worden. Dat was niet wenselijk omdat een instrument daardoor ook duurder wordt. TNO ontwierp een bijzondere telescoop die slechts uit twee spiegels bestond en dus zuiniger is met het licht.

De twee spiegels zijn technische hoogstandjes. Ze hebben geen rotatiesymmetrieassen waardoor er veel vrijheid is om het licht te manipuleren. Bij zulke vrijgevormoptiek kan één spiegel de functie overnemen van verschillende optische elementen. Figuur 2 laat een voorbeeld van zo'n spiegel zien: een banaanvormig optisch element. Dit soort spiegels vraagt een nauwkeurige fabricage. TNO was verantwoordelijk voor het ontwerp van TROPOMI en de fabricage van de vrijevormspiegels en zette hiervoor decennia aan ervaring en innovatie in optische vervaardiging in. De ongeveer tien centimeter grote spiegels worden gefabriceerd met



Figuur 2. Een vrijevormspiegel. Foto: TNO.

Missie	Type	Operationeel/ onder ontwikkeling	Detectiegrens methaan (kg/hr)	Pixel (km)
Tropomi (ESA/NSO)	Wereldwijde data	Operationeel	4000	7x7
CO2M (ESA)	Wereldwijde data	Ontwikkeling	1000	2x2
GHGSat	Gerichte meting van beperkt aantal locaties	Operationeel	100- 1000	0,05-0,025 x 0,05-0,025
TANGO	Gerichte meting van beperkt aantal locaties	Ontwikkeling	500–1000	0,3 x 0,3
MethaneSat	Gerichte meting van beperkt aantal locaties	Ontwikkeling	500–1000	0,1 x 0,4
Carbon- Mapper	Gerichte meting van beperkt aantal locaties	Ontwikkeling	50-150	0,03x0,03

Tabel 1. Indicatie van detectiegrenzen (kleinste emissie die door de satelliet gemeten zou moeten kunnen worden) voor methaan van verschillende satellietmissies die operationeel of in ontwikkeling zijn [2].

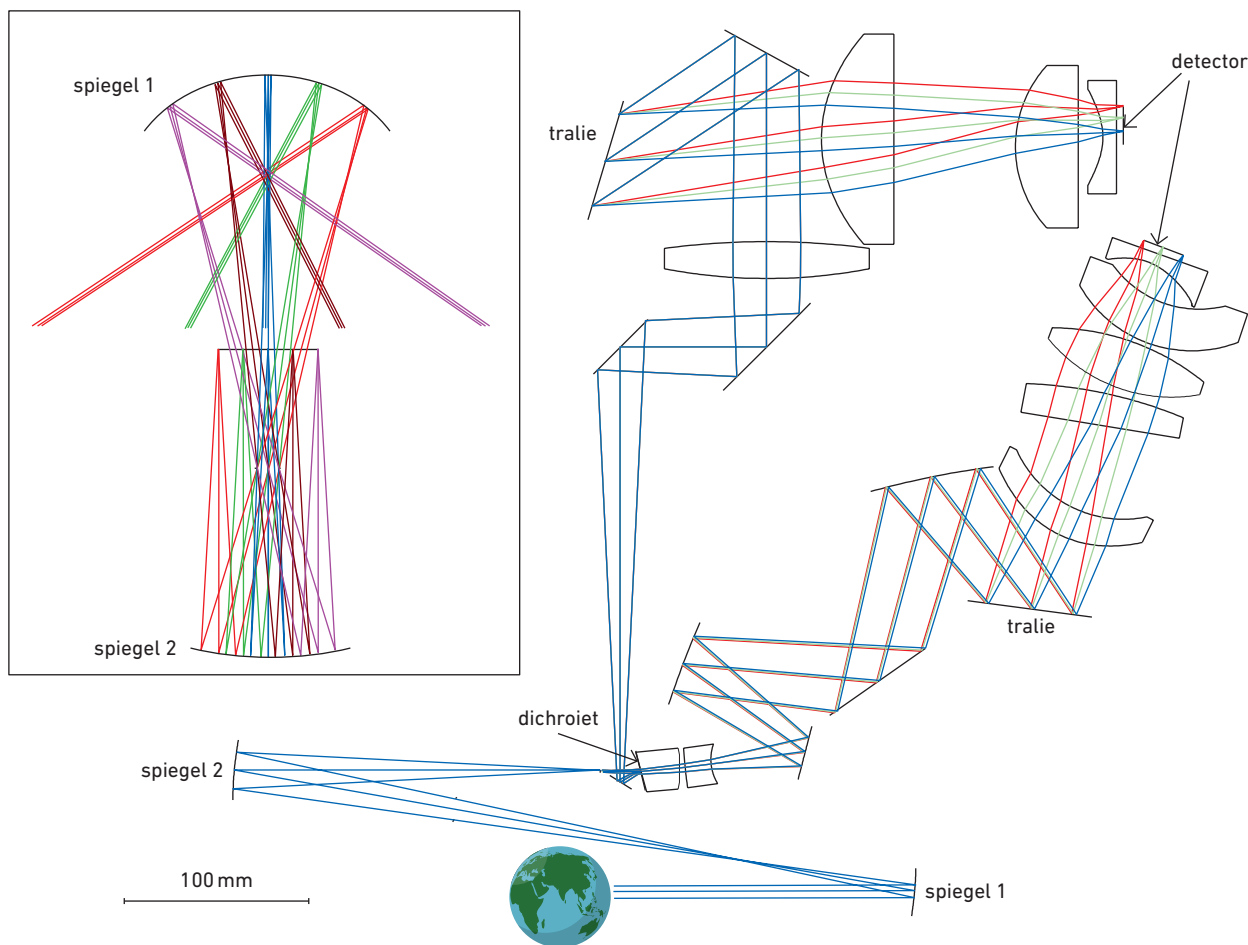
een nauwkeurigheid van honderd nanometer met speciaal ontworpen diamantdraaiprocessen – een temperatuurstijging van één tiende graad in het aluminium veroorzaakt daarbij al een grotere vervorming dan de vereiste nauwkeurigheid. Door middel van een contactloze meetmethode kan op vijftien nanometer nauwkeurig gecontroleerd worden of de spiegel aan de specificaties voldoet – een meting die haast net zo uitdagend is als het maken van de spiegel zelf. De uitdaging stopt overigens niet bij het maken van de spiegel, ook de assemblage van de optiek in het TROPOMI-instrument zorgt voor veel technische uitdagingen. De nauwkeurige spiegels vragen namelijk op hun beurt weer om een nauwkeurige ophanging en uitlijning. Kalibratiewerkzaamheden zijn van groot belang om er zeker van te zijn dat het geassembleerde instrument voldoet aan de specificaties. Hiernaast moet bij alles rekening gehouden worden dat het instrument de extreme condities van het lanceren moet kunnen overleven

(bijvoorbeeld schokken) en dat het uitdagende operationele condities kent. Het instrument moet thermisch stabiel opereren over honderden graden temperatuurverschil omdat anders alle precieze optica uit het lood raakt en het moet ondanks de degradatie door straling jaren meegaan. Boven alles: een satellietinstrument als TROPOMI moet in één keer goed functioneren. Reparaties aan satellietinstrumenten komen eigenlijk nooit voor – de beroemde reparatie van de Hubble-ruimtetelescoop daargelaten. Vandaar dat uitgebreide kalibraties en verificatiecampagnes voor lancering moeten worden uitgevoerd. Toen na de lancering de eerste succesvolle dataproducten van TROPOMI beschikbaar kwamen, was het dus niet alleen een feest voor klimaat en milieu, maar ook voor technici die werkten aan het instrument en de optica. In figuur 3 is het optisch ontwerp van TROPOMI in meer detail getoond. De twee aanzichten van de tweespiegeltelescoop laten zien dat het afgebeelde deel van het aardoppervlak breed is in

één richting en smal in de ander, zoals het geval is bij een pushbroom-instrument. Ten behoeve van duidelijkheid zijn slechts twee van de vier spectrometers getoond, NIR en UVIS, en zijn sommige vouwspiegels die uit het vlak komen, in het vlak getekend. Over de detector lopen de verschillende golflengtes in het vlak van de tekening, en de pixels uit het vlak. De telescoopspiegels beelden het licht van de aarde af, waarna het naar twee verschillende spectrometers wordt geleid. De dichroïet splitst het licht in smallere spectrale banden, wat gunstig is voor de transmissie van de spectrometers, die allemaal uit veel meer oppervlaktes bestaan dan de telescoop. Het grote aantal elementen in de spectrometers kenschetst de complexiteit van de ophanging en uitlijning.

Emissies meten

Een van de innovaties van TROPOMI is dat het instrument voldoende ruimtelijke resolutie heeft om op basis van één enkele observatie emissies te kunnen detecteren en te kwantificeren. Een goed voorbeeld hiervan zijn broeikasgasemissies. Het broeikasgas methaan kan door TROPOMI gemeten worden met een resolutie van zeven bij zeven kilometer. Onderzoekers slaagden er in om lekken bij delfinstallaties voor fossiele brandstoffen op te sporen, zoals emissies van een pijpleiding in Turkmenistan, van Amerikaanse olievelden en van kolenmijnen in Australië. Hoewel dit grote successen zijn, leren we ook met TROPOMI wat we nog niet kunnen. Het instrument kan namelijk alleen grote bronnen meten, die gezamenlijk slechts voor een klein deel van de totale wereldwijde methaanemissies verantwoordelijk zijn – in de ordegrootte van enkele procenten. Ook zijn er vandaag de dag nog geen satellieten die op structurele basis bronnen van CO₂ kunnen meten, terwijl dat gas de grootste bijdrage levert aan het opwarmen van de aarde – mede omdat dit technologisch uitdagender is. Om de toepasbaarheid van emissiemetingen uit de ruimte te verhogen zijn dan ook verregaande innovaties nodig. Over de hele wereld werken



Figuur 3. Stralengang in TROPOMI. Afbeelding: David Nijkerk, afbeelding aarde: Freepik.com.

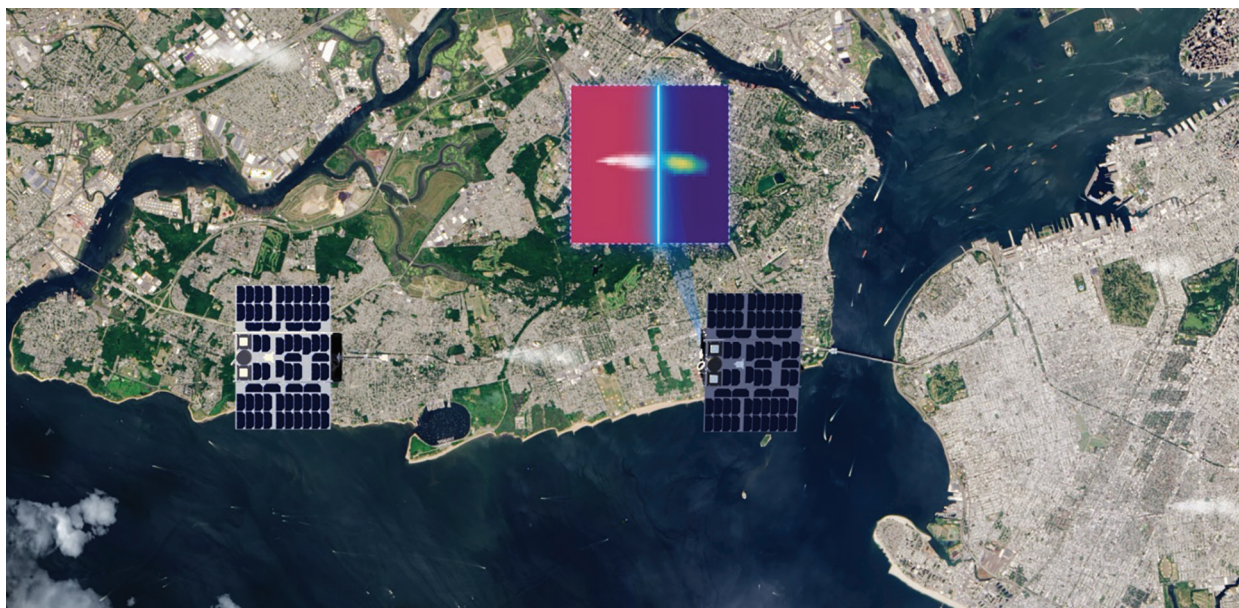
teams aan nieuwe generaties satellietssystemen die speciaal ontworpen zijn om emissies te meten op specifieke locaties. Deze systemen meten niet zoals TROPOMI dagelijks de hele wereld, maar gebruiken veelal wendbare satellieten. Hierdoor kunnen zij observaties maken van een beperkt aantal kleine gebieden ter grootte van enkele tientallen vierkante kilometers met een zeer hoge ruimtelijke resolutie en zo in te 'zoomen' op een select aantal bronnen van emissies. Van zulke systemen is een groter aantal nodig om regelmatig op meerdere plaatsen te kunnen meten. De enige partij die zo'n systeem operationeel heeft, is het Canadese bedrijf GHG-Sat, dat op commerciële basis methaanemissies meet en de data verkoopt aan zijn klanten. Het Environmental Defense Fund (EDF), een Amerikaanse NGO, werkt aan een

methaansatelliet. Recent kondigde de Californische investeerders en filantropen de CarbonMappermissies aan. ESA werkt aan de realisatie van de CO₂M-missie die wereldwijd grote bronnen van CO₂ en methaan zal gaan waarnemen. In samenwerking met ESA werken Nederlandse partijen ISISpace, TNO, SRON en KNMI aan het TANGO-instrument, dat middelgrote bronnen aan methaan en CO₂ kan gaan meten op het niveau van individuele installaties. Deze missies moeten ervoor gaan zorgen dat we steeds kleinere bronnen van broeikasgasemissie in kaart kunnen brengen vanuit de ruimte. Tabel 1 laat zien wat de verwachte detectiegrenzen zijn van deze missies voor methaan. De getallen zijn slechts een indicatie van de grens, want niet van alle systemen is voldoende publieke informatie beschikbaar om

een eerlijke vergelijking te kunnen maken. Daarnaast hangt de mogelijkheid om een emissie te meten sterk af van de omstandigheden (hoeveelheid zonlicht of wind) en het type bron (continu of incidenteel).

Sneller en kleiner

De satellietmissies uit tabel 1 hebben de potentie om bij een aanzienlijk deel van de bronnen die verantwoordelijk zijn voor de uitstoot van broeikasgassen emissiemetingen te gaan doen. TANGO is hiervan een goed voorbeeld. Deze missie is ontworpen om CO₂-emissies te meten met een detectiedrempel van ≥ 5 megaton per jaar (Mt/yr), en er wordt gestreefd om zelfs $\geq 2,5$ Mt/yr te halen, wat goed is voor respectievelijk 44% and 66% van de jaarlijkse CO₂-emissies door de wereldwijde fossiele energieopwekking. Voor methaanemissies geldt een



Figuur 4. Impressie van de TANGO-missie bestaande uit twee satellieten die in een gebied van 30 x 30 km via NO₂-metingen (linker satelliet/rode meting) en de CO₂/CH₄-metingen (rechter, blauw) emissies kwantificeren van een installatie. Afbeelding: TNO.

detectiedrempel van ≥ 10 kt/yr, waarbij er gestreefd wordt naar ≥ 5 kt/yr, wat goed is voor respectievelijk 68% en 75% van de jaarlijkse wereldwijde uitstoot van industriële emissies (olie- en gasindustrie, vuilnisbelten en kolenmijnen). Bovendien zal TANGO NO_x-metingen doen om CO₂-pluimen beter te detecteren.

Iedere TANGO-satelliet is uitgerust met een door TNO ontwikkeld Spectrolite-instrument. Het instrument leunt op ervaring met vrijvormoptiek die is opgedaan bij het ontwerpen van TROPOMI. Het is daardoor compact, met tegelijkertijd een hoge resolutie. Om de missies snel te kunnen realiseren en betaalbaar te houden, worden de instrumenten geïntegreerd in CubeSats die gestandaardiseerde maten en lanceermogelijkheden hebben. In totaal weegt één TANGO-satelliet zo'n twintig kilogram. De Sentinel 5p-satelliet, met TROPOMI als enige instrument, weegt zo'n negenhonderd kilogram. Deze miniaturisatie is mogelijk omdat, anders dan bij TROPOMI, er niet voor gekozen is om een breed scala aan gassen te meten, maar om methaan en CO₂ in een smalle band rond de 1,6 μm (SWIR) te meten. Ook meet TANGO maar op één gebied van zo'n 30 x 30 km per meting en kan het een

beperkt aantal locaties per dag meten. De ruimtelijke resolutie van TANGO is geoptimaliseerd (300 x 300 meter) om zo goed mogelijk emissies te meten en de TANGO-satellieten zijn beweeglijk: ze kunnen gericht worden op een specifieke bron op aarde waardoor een sterker meetsignaal wordt verkregen. Door dit alles zou de missie al over enkele jaren gerealiseerd kunnen worden, voor enkele tientallen miljoenen euro's, wat een ordegrrootte minder is dan de honderden miljoenen die grote instrumenten als TROPOMI of missies als CO₂M kosten.

TANGO wordt een gespecialiseerd meetinstrument dat vanaf 2025 een groot deel van de antropogene broeikasgasemissie wereldwijd in kaart probeert te brengen. Of dit gaat lukken, zal deels afhangen van de technologische ontwikkeling, het zoeken naar financiering voor de missie en van de keuzes van ESA en de Nederlandse overheid.

Gezien het groeiend aantal satellietmissies dat zich richt op het meten van emissies staat één ding vast: er is een evolutie gestart waarin wetenschappelijke aardobservatie-instrumenten zich steeds meer ontwikkelen in operationele monitoringsystemen die een belangrijke bijdrage kunnen gaan

leveren in beleid en onderzoek naar problemen met een maatschappelijke impact zoals klimaatverandering.

Anton Leemhuis studeerde werktuigbouwkunde (2004) en wijsbegeerte van wetenschap, technologie en samenleving (2005). Hij had verschillende technische en commerciële rollen bij TNO in de energiesector en was van 2011 tot 2017 directeur van TNO's kantoor in het Midden-Oosten. In zijn huidige functie is Anton verantwoordelijk voor de aardobservatieactiviteiten van TNO. anton.leemhuis@tno.nl

David Nijkerk is natuurkundige, na zijn promotie (2002) werkzaam bij TNO. Sinds 2010 werkt hij binnen de afdeling Optica als optisch ontwerper. Hij houdt zich bezig met het ontwikkelen van nieuwe rekenmethodes voor het ontwerpen en optimaliseren van optische systemen. david.nijkerk@tno.nl

REFERENTIES

1. Abelardo Pérez Albiñana et al., Sentinel-5: the new generation European operational atmospheric chemistry mission in polar orbit, *Proc. SPIE* **10403**, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXV (30 augustus 2017); doi: 10.1117/12.2268875.
2. Gebaseerd op white paper van J. Elkind et al., *Nowhere to Hide: Implications for Policy, Industry, and Finance of Satellite-Based Methane Detection*, TNO en Columbia University, (oktober 2020) en informatie op <https://carbonmapper.org>.