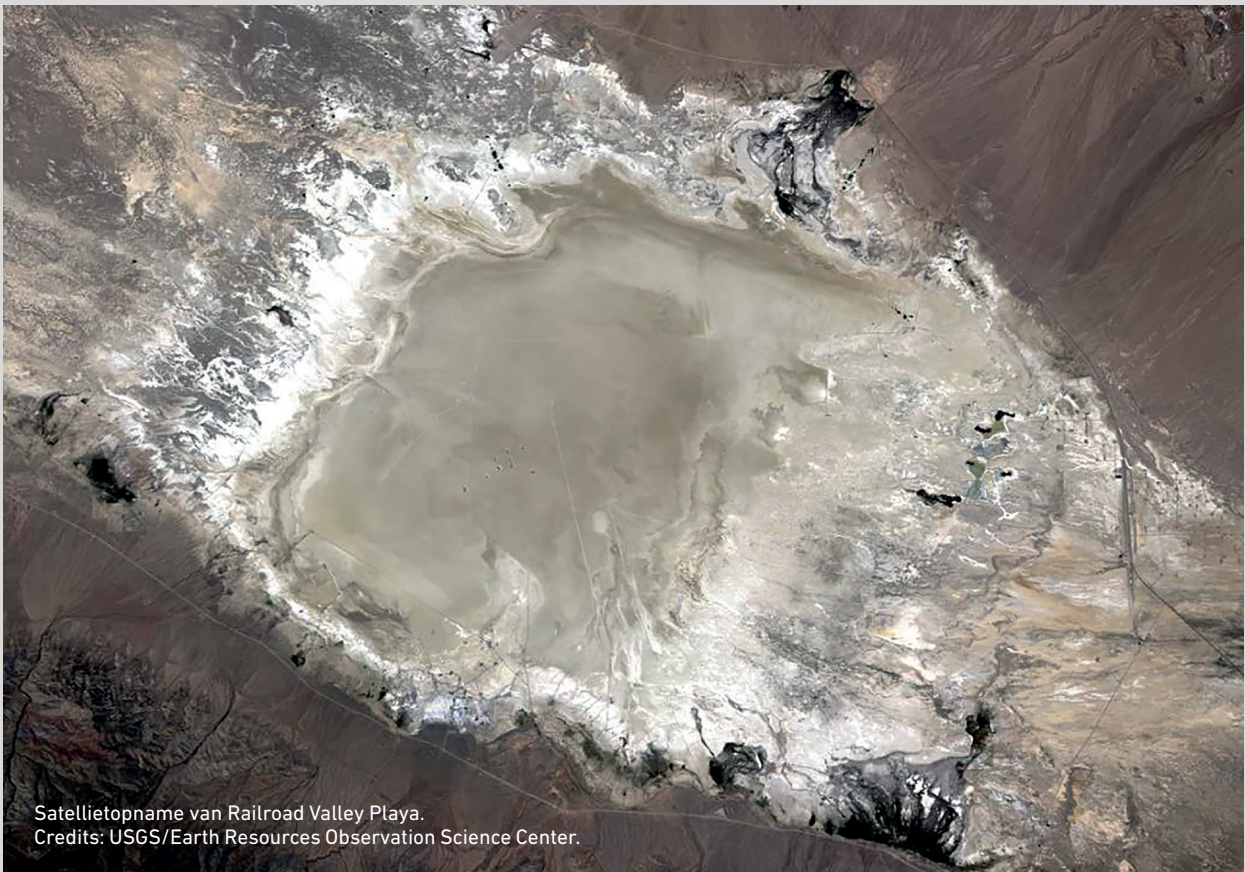


EEN INKIJK IN MIJN SCRIPTIEONDERZOEK BIJ SRON

SATELLIETEN KALIBREREN VOOR NAUWKEURIGE KLIMAATOBSERVATIES



Satellietopname van Railroad Valley Playa.
Credits: USGS/Earth Resources Observation Science Center.

Satellieten zijn cruciaal voor het monitoren van het milieu. Ze brengen urgente kwesties als klimaatverandering (letterlijk) in kaart. Vanuit de ruimte kunnen we op wereldwijde schaal luchtvervuiling volgen en broeikasgassen meten. Satellieten als Sentinel-5P, met het Nederlandse instrument TROPOMI aan boord, voeren een belangrijk deel van deze observaties uit. Vanuit een baan om de aarde helpen ze ons de chemische samenstelling van de atmosfeer te begrijpen. Maar hoe zorgen we ervoor dat de gegevens die deze satellieten verstrekken betrouwbaar zijn? Dit is waar het onderzoek van masterstudent Carlijn Veldhuis naar kruiskalibratie (*cross-calibration*) van satellieten in beeld komt.

Van oktober 2023 tot juli 2024 liep ik, eerstejaars masterstudent sterrenkunde aan Universiteit Leiden, mijn onderzoeksstage bij SRON, het Nederlands Instituut voor Ruimteonderzoek. Daar hield ik me bezig met de kruiskalibratie tussen TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) en een vergelijkbaar instrument op de GOSAT-2-satelliet. Kruiskalibratie houdt in dat de metingen van twee verschillende satellieten met elkaar worden vergeleken en gecorrigeerd. Zo krijgen we consistentere en nauwkeurigere resultaten, en vergroten we de betrouwbaarheid van satellietgegevens. Mijn onderzoeksdoel is om een methode te ontwikkelen waarmee we de noodzaak van interne kalibratiesystemen kunnen verminderen. Dit is vooral van belang voor de opkomende generatie van kleine, lichte en goedkope satellieten, ook wel SmallSats genoemd. Een belangrijk onderdeel van mijn onderzoek is het gebruik van een referentielocatie op aarde, in dit geval de Railroad Valley Playa (RRV) in Nevada (zie figuur inks). Deze woestijnachtige, droge vallei heeft een relatief constante reflectie van zonlicht door het homogene oppervlak en het gebrek aan verstoringen van mensen of vegetatie. Dat maakt deze plek zo geschikt voor satellietkalibratie. RRV heeft dus bekende, stabiele en relatief uniforme reflectiewaarden. Door vervolgens de radiatiewaarden van TROPOMI en GOSAT-2 boven RRV te vergelijken, kon ik systematische verschillen tussen de satellieten identificeren en corrigeren. Op basis van deze vergelijking boven RRV konden afwijkingen tussen de instrumenten worden gekwantificeerd en gecorrigeerd.

Toekomst van kalibratie

De resultaten van mijn onderzoek hebben voornamelijk implicaties voor toekomstige ruimtevaartmissies. SmallSats, die steeds meer worden gebruikt voor aardobservaties, hebben vaak geen interne kalibratiesystemen vanwege hun beperkte grootte en gewicht. Kruiskalibratie, gebruikma-

ECOLOGISCHE VOETAFDruk

Hoewel satellieten zoals TROPOMI en GOSAT-2 van onschatbare waarde zijn voor het monitoren van klimaatverandering en het verzamelen van gegevens over broeikasgassen, moeten we ook kritisch kijken naar hun eigen ecologische voetafdruk. Satellieten lanceren en onderhouden vervuilen de aardatmosfeer aanzienlijk en ook bij de productie van onderdelen komen broeikasgassen vrij. Dit roept vragen op over de duurzaamheid van technologieën die zijn ontworpen om te helpen bij het bestrijden van klimaatverandering.

kend van vaste referentielocaties op aarde, kan dan uitkomst bieden om toch nauwkeurige gegevens te blijven leveren. Deze techniek zou vooral nuttig zijn voor missies die broeikasgasuitstoot monitoren, zoals de toekomstige TANGO-satelliet. TANGO wordt een kleine satelliet die onder andere samen met TROPOMI gebruikt kan worden om op lokaal niveau vervuilers te identificeren.

In mijn onderzoek heb ik verschillende correctiemodellen getest, zoals het Lambertian-model en het geavanceerdere mRPV-model (*modified Rahman-Pinty-Verstraete*). Het Lambertian-model gaat uit van een theoretisch perfecte diffuse reflectie, waarbij het aardoppervlak licht in alle richtingen gelijkmatig weerkaatst. Dit model is eenvoudig en snel toepasbaar, maar houdt geen rekening met de variaties in reflectie door hoekafhankelijkheden.

Het mRPV-model daarentegen biedt een complexere en nauwkeurigere benadering van de *bidirectional reflectance distribution function* (BRDF). Dit model gebruikt meerdere parameters om de reflectie van het oppervlak beter te karakteriseren, zoals de invloed van kijk- en zonshoek, en is gebaseerd op gedetailleerdere reflectiedata, bijvoorbeeld verkregen via *multi-angle imaging spectroradiometer* (MISR)-metingen. Hierdoor kan het model subtiele variaties in de reflectie van niet-Lambertiaanse oppervlakken, zoals woestijngebieden, nauwkeuriger beschrijven.

Hoewel het mRPV-model theoretisch gezien preciezere resultaten oplevert, bleek uit mijn onderzoek dat het eenvoudigere Lambertian-model voldoende was voor de kruiskalibra-

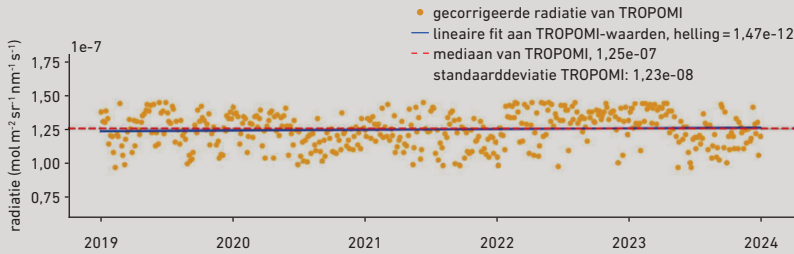
tie van TROPOMI en GOSAT-2. De geavanceerdere correcties van het mRPV-model verbeterden de relatieve kalibratie tussen de twee satellieten nauwelijks, wat de keuze voor het Lambertian-model in dit specifieke geval rechtvaardigt.

Eensgezind

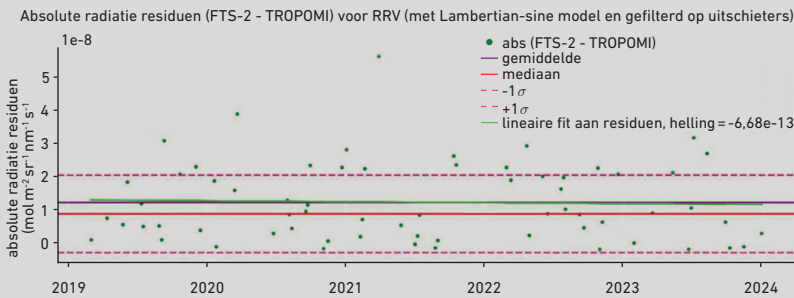
Na vijf jaar dataverzameling toont TROPOMI nog steeds opmerkelijke stabiliteit. Uit de resultaten van mijn onderzoek blijkt dat het degradatieniveau van de TROPOMI-SWIR-module (*short-wave infrared*) minder dan één procent per jaar bedraagt. Dit is essentieel voor het waarborgen van de betrouwbaarheid van de metingen op de lange termijn. Het instrument aan boord van GOSAT-2 toont een vergelijkbaar trage degradatie.

Daarnaast laten de resultaten een sterke overeenkomst zien tussen de metingen van TROPOMI en GOSAT-2. De residuen die overblijven wanneer je de radiatiewaarden van beide satellieten van elkaar aftrekt, hebben een gemiddelde waarde die rond de nul ligt. Dat betekent dat de twee satellieten grotendeels in overeenstemming zijn met elkaar. Dit is belangrijk voor verdere samenwerking tussen satellieten voor het monitoren van onze atmosfeer.

Een belangrijke beperking van dit onderzoek en de nauwkeurigheid was het relatief lage aantal beschikbare datapunten voor de kruiskalibratie tussen TROPOMI en GOSAT-2. Een van de redenen voor dit beperkte aantal datapunten was de filtering van de gegevens op basis van specifieke voorwaarden, zoals de maximale instrument-zenithoek (IZA) en de minimale aanwezigheid van wolken.



Figuur 1. De grafiek toont de stabiliteit van het TROPOMI-instrument. Zowel de mediaan als de helling van de lineaire fit zijn bijna gelijk aan nul. Dit duidt erop dat er over de onderzochte periode geen significante verandering is in de gemeten radiatiewaarden. De mediaan geeft aan dat de waarden gemiddeld consistent blijven, terwijl een helling van nul betekent dat er geen duidelijke toename of afname in de radiatie wordt waargenomen, wat wijst op een stabiele instrumentprestatie zonder merkbare degradatie of systematische afwijkingen over tijd.



Figuur 2. De grafiek laat zien dat de residuele radiatiewaarden rondom nul liggen, met wederom een vrijwel horizontale helling van de lineaire fit.

Bovendien waren er slechts een beperkt aantal momenten waarop beide satellieten exact dezelfde gebieden observeerden, wat de mogelijkheden voor directe vergelijking verder beperkte.

Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de verschillen in hun banen en waarnemingsstrategieën. TROPOMI cirkelt rond de aarde in een zon-synchrone baan en scant daarbij de aarde met de *push-broom*-techniek. Dat wil zeggen dat TROPOMI voortdurend gegevens verzamelt langs een breed gebied tijdens elke omwenteling, waarbij het dagelijks dezelfde geografische gebieden passeert op bijna hetzelfde lokale tijdstip (rond 13:30 uur). FTS-2 – daarentegen – opereert in een vergelijkbare zon-synchrone baan, maar maakt gebruik van een *point-and-shoot*-methode. Dit betekent dat FTS-2 specifieke gebieden selectief observeert, in plaats van continu een breed gebied te scannen zoals TROPOMI.

Dit zorgt voor een nauwkeuriger beeld van kleinere gebieden, maar beperkt tegelijkertijd de overlap met de TROPOMI-data, aangezien FTS-2 niet voortdurend dezelfde gebieden observeert.

Gedetailleerd en betrouwbaar

Mijn onderzoek naar de kruiskalibratie van TROPOMI en GOSAT-2 toont niet alleen aan dat de methoden effectief zijn, maar ook dat er nog ruimte is voor verbetering. Vooral de integratie van geavanceerdere correctiemodellen zoals het mRPV-model zou in de toekomst nauwkeurigere resultaten kunnen opleveren. Dit soort onderzoek speelt een belangrijke rol in de ontwikkeling van SmallSats zoals (de deels Nederlandse) TANGO. SmallSats kunnen de broeikasgassen op aarde nauwkeuriger in kaart brengen vanwege hun kleinere pixels. Continue innovatie op het gebied van satelliet-

kalibratie zal in de toekomst steeds gedetailleerdere en betrouwbaardere gegevens opleveren om klimaatverandering aan te pakken.

Ondanks de veelbelovende resultaten van kruiskalibratie kan het nooit volledig de interne kalibratie vervangen. Interne kalibratiesystemen blijven essentieel voor het waarborgen van de hoogste nauwkeurigheid, vooral omdat kruiskalibratie afhankelijk is van externe factoren, zoals de eigenschappen van de reflectielocaties en weersomstandigheden. Daarnaast kunnen extra correctiemethoden ervoor zorgen dat er meer datapunten behouden blijven, doordat er minder data gefilterd hoeven te worden.

Waardevolle ervaring

De ontwikkeling van toekomstige SmallSats leunt sterk op onderzoek naar verscheidende kalibratiemethoden waaronder kruiskalibratie. Het werk dat bij SRON wordt gedaan, speelt hierin een sleutelrol. SRON staat midden in de huidige ontwikkelingen in de ruimtevaart, en de grenzen van ruimteonderzoek worden daar continu verlegd.

Hierdoor was mijn ervaring als student-stagiair (*research intern*) bij SRON buitengewoon leerzaam en uitdagend. Ik kreeg de kans om gedurende negen maanden een klein deel van SRON mee te maken. Wat mij vooraf vooral aansprak aan dit onderwerp is dat het niet alleen technisch uitdagend is, maar ook maatschappelijke relevant vanwege de toepassing in klimaatonderzoek.

De werkomgeving bij SRON was stimulerend; ik werd omringd door topwetenschappers! Daarnaast waren de wekelijkse meetings met mijn begeleider Tim van Kempen, expert op het gebied van instrumentatie en dan met name TROPOMI, een goede kans om feedback te krijgen op mijn onderzoeksvaardigheden. Zo leerde ik naast omgaan met en verwerken van grote datasets met Python ook hoe je onderzoek structureert en deadlines haalt. Al met al was mijn stage bij SRON een waardevolle ervaring die me zowel professioneel als persoonlijk heeft laten groeien.