

# VU Research Portal

## Het broeikaskompas

Houweling, S.

2018

### **document version**

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

### **citation for published version (APA)**

Houweling, S. (2018). *Het broeikaskompas: De koers van de mondiale opwarming*. Vrije Universiteit.

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

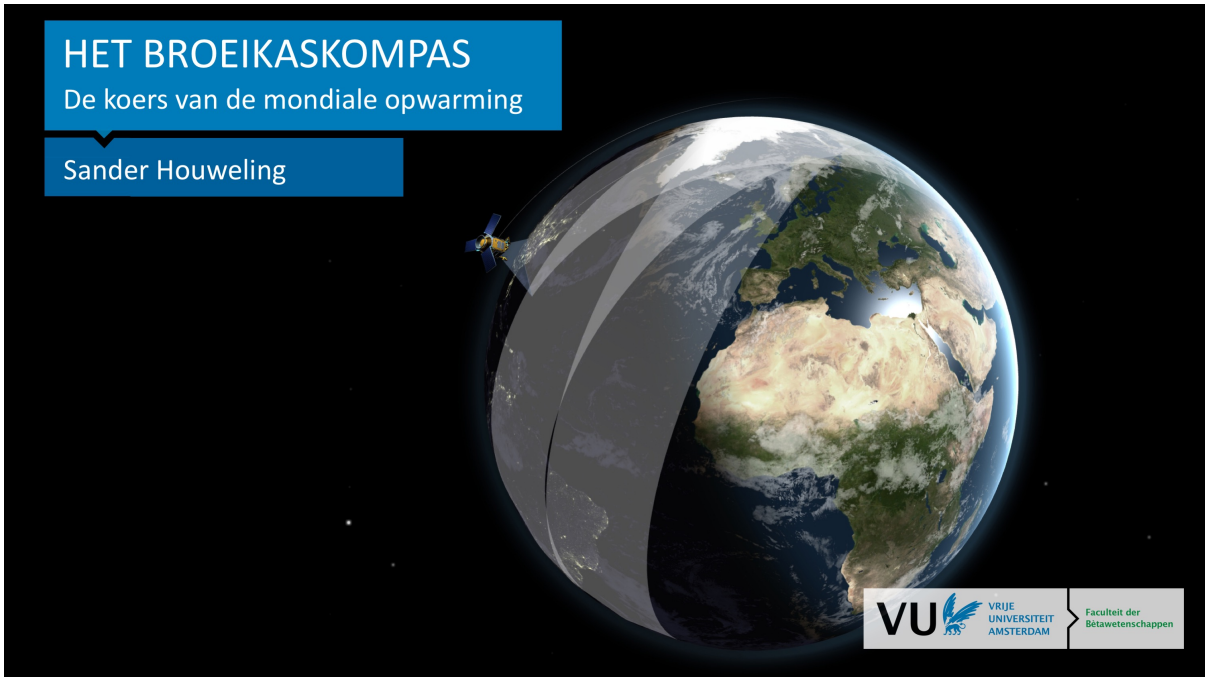
### **E-mail address:**

[vuresearchportal.ub@vu.nl](mailto:vuresearchportal.ub@vu.nl)

# HET BROEIKASKOMPAS

De koers van de mondiale opwarming

Sander Houweling



VU Aula, 7 September 2018 15:45.

Geachte mijnheer de rector, dames en heren,

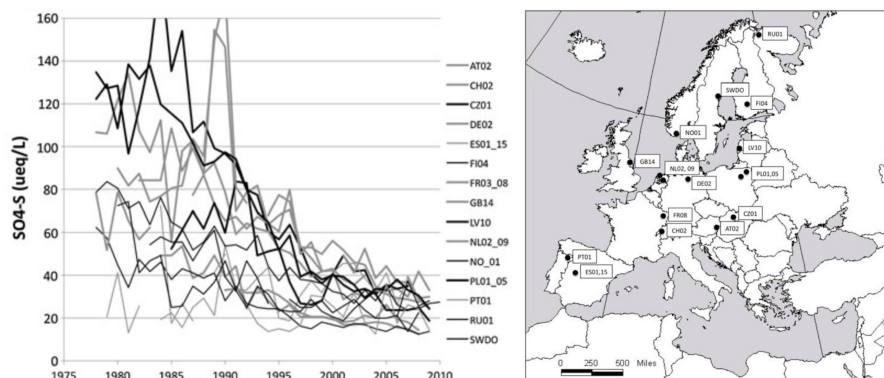
Het klimaat op aarde verandert, en zoals het Inter-governmental Panel on Climate Change (IPCC) het verwoordt: 'De invloed van menselijk handelen op het klimaatsysteem is duidelijk'. Kortom, we hebben het aan onszelf te danken. In Nederland hebben we net een uitzonderlijk warme en droge zomer achter de rug. Naar mijn overtuiging kan het zonder klimaatopwarming ook uitzonderlijk droog zijn, maar warmterecords zouden dan niet zo vaak sneuvelen. Het past allemaal in het KNMI'14 klimaatscenario voor Nederland, dat spreekt over zomers met heftigere buien en een verhoogde kans op droogte. Een goede kans dus dat dit in de toekomst vaker gaat gebeuren.

De vraag is hoe we met klimaatverandering omgaan, en wat de consequenties zijn van de keuzes die we maken voor het toekomstige klimaat. Dat is waar mijn onderzoek en deze oratie over gaan, namelijk de koers van het klimaatscenario dat werkelijkheid werd en waarop we nu nog invloed uit kunnen oefenen door de keuzes die we maken.

Het verhaal gaat dat de Iroquois-indianen 7 generaties vooruitdachten bij belangrijke beslissingen. Daar kunnen wij nog wat van leren. Verder dan het eind van deze eeuw wordt zelden gekeken. Wetenschappers, zoals ik, gaan niet over de keuzes die gemaakt worden: daar hebben we politici voor. De wetenschappelijke vraag, waar ik me sterk voor wil gaan maken, is waar we op uitkomen gegeven de politieke keuzes, en hoe we ervoor zorgen dat we weten op welke koers we zitten. In de komende 40 minuten ga ik proberen om U dat zo goed mogelijk uit te leggen.

Daarvoor gaan we eerst terug naar de jaren '80, toen ik me nog niet bewust was van deze vragen. Ik denk ook niet dat ik destijds betrappt kon worden op enige interesse in het klimaat. Maar ik had wel interesse, en ook een bovengemiddeld verantwoordelijkheidsgevoel denk ik, voor de natuur- en milieuproblematiek. Het gifschandaal bij Lekkerkerk bijvoorbeeld maakte veel indruk op mij. In 1980, ik was toen 10, kwam aan het licht dat daar een woonwijk was gebouwd op een stortplaats voor chemisch afval. Vanwege de bodemsanering werden de inwoners geëvacueerd naar een locatie die al snel de bijnaam 'camping Benzenidorm' kreeg.

Ik ging scheikunde studeren in Wageningen omdat de chemie van de natuur mij interesseerde. Ergens tijdens mijn studie zijn deze interesses, chemie en milieu, samengekomen. Wat mij als student intrigeerde was de zure regen problematiek. Ik ging naar Utrecht om een college atmosferische chemie te volgen bij Peter Bultjes, om beter te begrijpen hoe dat precies zat.

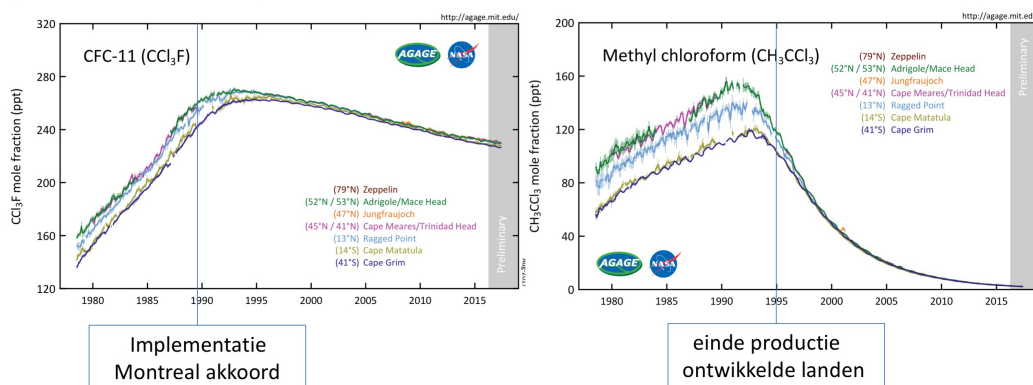


**Figuur 1:** De waargenomen verandering van sulfaat in regenwater op Europese meetstations (Lajtha and Jones, 2013).

Figuur 1 laat zien hoe de hoeveelheid sulfaat in regenwater sinds de jaren '80 is gedaald. Het is een prachtig voorbeeld hoe wetenschap en politiek de krachten kunnen bundelen om milieuproblemen aan te pakken. Door ontzwareling van brandstoffen en rookgassen is de zwaveldioxide emissie in Nederland met ongeveer een factor 10 gedaald, wat terug te zien is in het regenwater.

Een vergelijkbaar, of misschien zelfs wel beter voorbeeld volgde niet veel later: In Montreal werd in 1987 afgesproken om de productie van Chloor Fluor Koolwaterstoffen, ofwel CFK's, uit te faseren. Het leidde het einde in van een grootschalig experiment met de ozonlaag, die ons voor schadelijke UV-straling beschermt, dat anders rampzalig had kunnen aflopen. Het is indrukwekkend om te zien hoe de CFK concentraties in de atmosfeer sindsdien zijn afgenomen [zie Figuur 2]. Het toont ook de waarde aan van langdurige atmosferische metingen om te kunnen controleren of internationale milieuaafspraken worden nageleefd. Het herstel van de ozonlaag zelf heeft meer tijd nodig, hoewel de eerste tekenen van herstel voorzichtig zichtbaar worden.

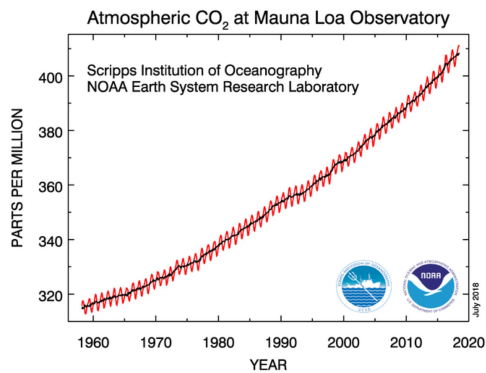
Ik besloot een PhD in atmosferische chemie te doen. De mogelijkheid diende zich aan om het broeikasgas methaan ( $CH_4$ ) te bestuderen. Dat vond ik aanvankelijk een tamelijk saai onderwerp omdat de chemie al nagenoeg bekend was. Ik heb me door mijn promotor Jos Lelieveld over laten halen om het toch te doen, een keuze waar ik nooit spijt van heb gekregen. Het volgende milieuprobleem diende zich namelijk aan, groter en invloedrijker dan alles ervoor bij elkaar.



**Figuur 2:** Waargenomen veranderingen in de achtergrondconcentraties van CFK's.

Figuur 3 toont de beroemde Keeling curve van kooldioxide ( $CO_2$ ) metingen op Mauna Loa, een ruim 4 kilometer hoge vulkaan op Hawaï waar David Keeling in 1958 begon met het verzamelen van luchtmonsters. De curve loopt steeds steiler omhoog door het toenemende gebruik van fossiele brandstoffen, en lijkt zich nog weinig aan te trekken van onze inspanningen om daar wat aan te doen. De jaargemiddelde  $CO_2$  concentratie in de atmosfeer is inmiddels overal aan het aardoppervlak de 400 ppm gepasseerd, inclusief de Zuidpool. Alleen in de zomer komen sommige afgelegen stations met een grote seizoen variatie er nog onder. De invloed van  $CO_2$  opname door bossen is daar nog net groot genoeg voor.

400 ppm  $CO_2$  betekent gemiddeld één  $CO_2$  molecuul op elke 2500 lucht moleculen, een relatief kleine bijdrage dus met een grote invloed. De jaarlijkse mondiale  $CO_2$  uitstoot is te vergelijken met een koolzuurbel ter grootte van 20000 kubieke kilometer. Dat klinkt al een stuk meer. Het komt overeen met een laag zuiver koolzuurgas van een halve kilometer dikte die heel Nederland bedekt.



**Figuur 3:** De waargenomen toename van kool-dioxide in de atmosfeer.

Hoe buigen we de mondiale groeicurve van CO<sub>2</sub> om, zoals ons dat in het verleden met zwaveldioxide en CFK's is gelukt? Het vergt de inzet van veel mensen wereldwijd, inclusief collega's in de zaal die zich hier dagelijks direct of indirect mee bezighouden. De bijdrage die ik persoonlijk kan leveren zal beperkt zijn, maar in samenwerking met anderen hoop ik desalniettemin een belangrijk verschil te kunnen maken.

Wetenschap begint met het stellen van vragen. Wat is er eigenlijk zo problematisch aan de uitstoot van CO<sub>2</sub> en andere broeikasgassen? Net als andere broeikasgassen is CO<sub>2</sub> een sterke kleurstof. Het bijzondere is alleen dat je daar niets van ziet als er bijvoorbeeld een auto langs rijdt. Om het effect waar te kunnen nemen moet je naar andere kleuren kijken, namelijk

in het thermisch infrarood, ver buiten het golflengtebereik van onze ogen. De kleur van broeikasgassen is eenvoudig zichtbaar te maken met infraroodcamera's.

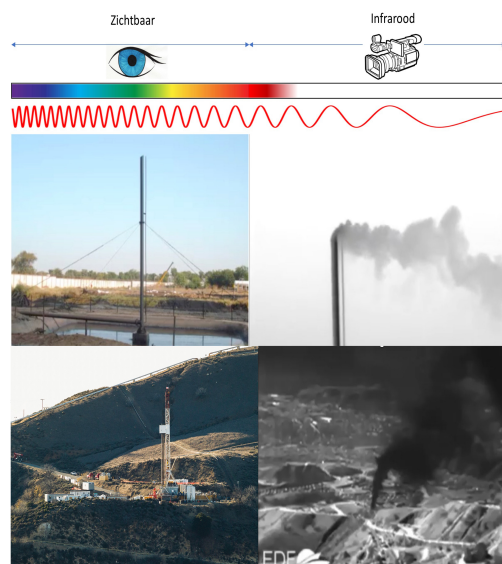
Deze pijp [zie Figuur 4] stoot het broeikasgas methaan uit, een kleurloos gas voor onze ogen, maar duidelijk waarneembaar met zo'n camera. Het komt goed uit dat broeikasgassen hun aanwezigheid verraden door hun kleur. Daardoor is namelijk waarneembaar waar ze vandaan komen. Een goed voorbeeld hiervan is opgenomen door een meetvliegtuig na een ongeluk met een gasopslagtank in Aliso Canyon, California [Figuur 4]. Hierbij kwam een grote hoeveelheid aardgas vrij. Op deze manier kan je dus aardgaslekkages opsporen en ook grootschalige broeikasgasemissies bepalen, zoals we later zullen zien.

Methaan, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O en andere broeikasgassen hebben de eigenschap om licht door te laten in het zichtbare golflengtegebied [zie Figuur 5]. De energie van de zon kan daardoor ongestoord het aardoppervlak bereiken. In de natuurlijke situatie, staat de aarde evenveel energie af als er binnenkomt, namelijk door middel van warmtestraling in het thermisch infrarood. Er is dan geen netto opslag of verlies van energie en de temperatuur op aarde blijft constant. Broeikasgassen zijn als een deken die deze warmtestraling tegenhoudt, waardoor er minder straling uitgezonden wordt de ruimte in. De aarde warmt daardoor op, wat de uitstraling van warmte versterkt, totdat er een nieuw evenwicht is bereikt bij een hogere temperatuur. De kleur van de toegenomen broeikasgassen is trouwens duidelijk waarneembaar vanuit de ruimte.

Figuur 6 laat verschillende bijdrages zien aan de opwarming van de aarde. De temperatuur op de rechter y-as is ten opzichte van de natuurlijke pre-industriële situatie toen de CO<sub>2</sub> concentratie 280 ppm was. De bijdrage van langlevende broeikasgassen bedraagt maar 25% (de groene zone in de figuur). De rest, waaronder veranderingen in waterdamp, wolkenbedekking en de afmeting van ijskappen, is het gevolg van de opwarming op een manier die deze netto versterkt. Het grootste gedeelte van de opwarming wordt dus veroorzaakt door positieve terugkoppelingen in het aardse klimaatstelsel.

Klimaatmodellen hebben de meeste moeite met deze indirecte bijdrage. In tegenstelling tot de bijdrage van de langlevende broeikasgassen die best goed bekend is. Desalniettemin, richt mijn onderzoek zich vooral op de groene broeikasgas-zone. Dat vraagt om een verklaring.

De belangrijkste door mensen geproduceerde broeikasgassen, kooldioxide en methaan, hebben een prominente rol in de natuurlijke koolstofcyclus op aarde. Zonder kooldioxide is er geen koolstofcyclus en daarmee ook geen leven op aarde. Vóór de industrialisatie was de natuurlijke concentratie CO<sub>2</sub> in evenwicht met natuurlijke processen op land en in de zee, dat zich in de loop van de millennia had ingesteld [zie Figuur 7]. Er waren wel variaties, opname en afgifte van CO<sub>2</sub> dus, maar die hieven elkaar netto op.



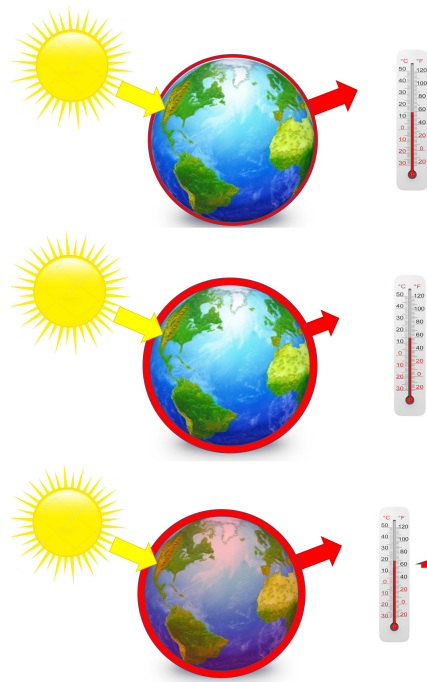
**Figuur 4:** Methaan emissies bij zichtbare (links) en infrarode (rechts) golflengtes.



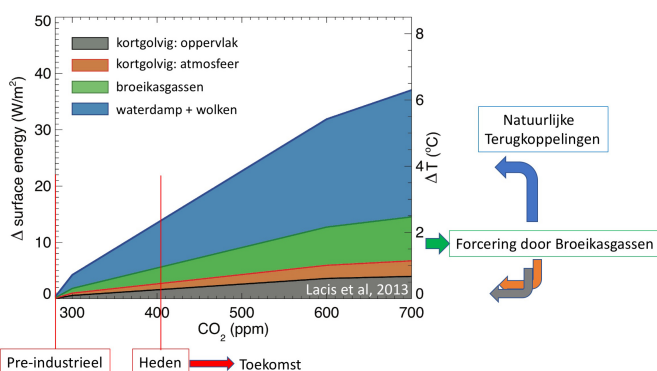
Door het verbranden van fossiele brandstoffen is de CO<sub>2</sub> mengverhouding in de afgelopen 200 jaar met ruim 40% procent gestegen. Die CO<sub>2</sub>-uitstoot heeft het natuurlijke evenwicht verstoord, met als gevolg dat de oceanen en de biosfeer op land netto ruwweg de helft van het fossiele CO<sub>2</sub> gingen opnemen. De natuur verleent ons daarmee een enorme dienst door een deel van het CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer te halen dat wij erin brengen. Hier is sprake van een negatieve terugkoppeling, die de verstoringen tegenwerkt. Om te weten wat de invloed van toekomstige emissies zal zijn op het klimaat moeten we weten hoe die emissies de concentratie zullen beïnvloeden, wat afhankelijk is van de natuurlijke terugkoppelingen. Toekomstige terugkoppelingen in de koolstofcyclus zijn echter in hoge mate onzeker. Dat verklaart mijn motivatie om de koolstofcyclus nader te bestuderen.

De koolstofcyclus kent twee belangrijke terugkoppelingen op nieuwe emissies. Ten eerste is er een directe terugkoppeling door CO<sub>2</sub> zelf. CO<sub>2</sub> is namelijk een voedingstof voor vegetatie, die harder gaat groeien als er meer van beschikbaar is. We zijn de natuur dus in feite aan het bemesten met CO<sub>2</sub>. Hoewel, zo eenvoudig zit de natuur niet in elkaar. Ik ken bijvoorbeeld niemand die de Nederlandse weides deze zomer probeerde te redden door CO<sub>2</sub> uit te rijden. Er zijn namelijk andere factoren die de groei beperken, zoals water in dit geval. Vaak ook de beschikbaarheid van andere meststoffen, of licht en temperatuur. Om deze reden zijn wetenschappers het er niet over eens of de natuur mondiaal gezien daadwerkelijk harder is gaan groeien door de toegenomen beschikbaarheid van CO<sub>2</sub>.

De tweede terugkoppeling van CO<sub>2</sub> op de groei van vegetatie is door klimaatverandering, indirect door CO<sub>2</sub> dus, bijvoorbeeld door veranderingen in temperatuur en waterbeschikbaarheid. Hoe dat uitwerkt is sterk afhankelijk van het soort ecosysteem, en de klimaatzone waarin het zich bevindt, wat het tot een complex geheel maakt. In het Arctisch gebied bijvoorbeeld neemt de opname van CO<sub>2</sub> toe vanwege een verlenging van het groeiseizoen, de periode dus waarin mossen en planten koolstof vast kunnen leggen. Het smelten van permafrost daarentegen stelt veenlagen bloot aan microbiële omzetting, wat leidt tot verlies van koolstof uit de bodem. Figuur 8 toont een verzakking van de grond als gevolg van dooiend permafrost, wat het landschap in het Arctisch gebied ingrijpend verandert.



**Figuur 5:** De stralingsbalans van zichtbaar (geel) en infrarood (rood) licht. Extra CO<sub>2</sub> remt de uitgaande straling (midden), waardoor de aarde opwarmt (onder).



**Figuur 6:** Bijdrages aan de mondiale klimaat- forcering ten opzichte van natuurlijke (pre-industriële) omstandigheden.

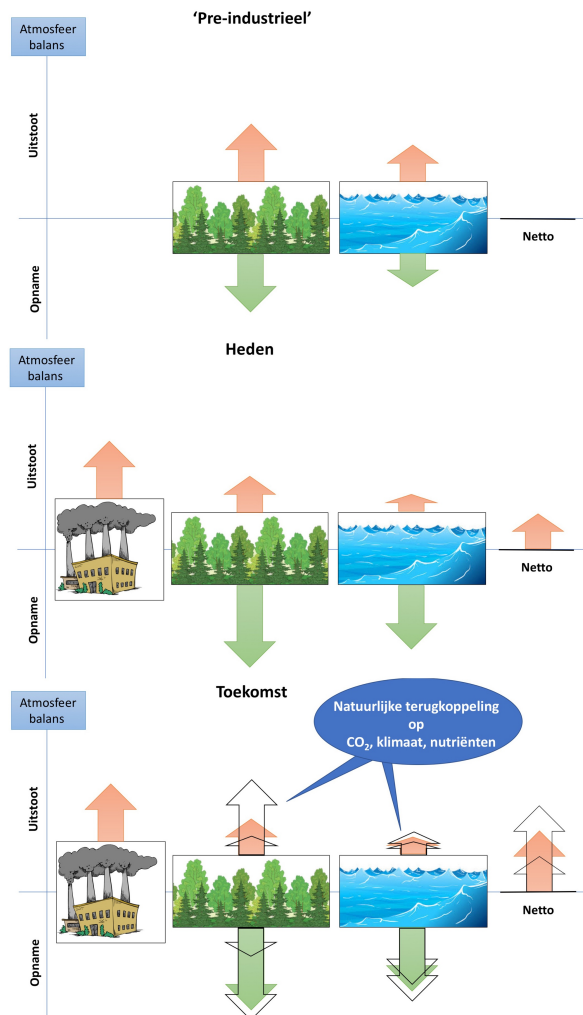
De optelling van alle terugkoppelingen samen leidt er in veel modellen toe dat de natuurlijke opname van het door mensen geproduceerde CO<sub>2</sub> in loop van deze eeuw terugloopt. De natuur zal ons dus in de toekomst niet in dezelfde mate blijven helpen. Dit beperkt de ruimte die overblijft voor toekomstige CO<sub>2</sub>-emissies, tenminste, als we de klimaatdoelstelling van maximaal 1.5 tot 2°C opwarming willen halen. Volgens de huidige schattingen is er nu nog 30 à 40% over van de ruimte die er pre-industrieel was. Er is dus minder ruimte over dan we inmiddels hebben verbruikt, maar die resterende ruimte is wel onzeker vanwege de natuurlijke terugkoppelingen.

Onzekere terugkoppelingen zijn er overigens niet alleen voor CO<sub>2</sub> maar ook voor CH<sub>4</sub>. Zo worden natuurlijke moerassen en overstromingsgebieden beïnvloed door klimaatverandering en is luchtvervuiling van invloed op de atmosferische chemie en daarmee op de gemiddelde levensduur van een CH<sub>4</sub> molecuul in de atmosfeer.

Op welke manier denk ik bij te kunnen dragen aan de kennis over broeikasgassen? De methode die ik daarvoor inzet maakt gebruik van atmosferische metingen van broeikasgassen. Deze metingen verschaffen informatie over variaties in de verdeling van deze gassen in ruimte en tijd. Die variaties zijn het gevolg van emissies aan het oppervlak en de verspreiding van geëmitteerde gassen in de atmosfeer door wind en turbulente menging. Het is mogelijk om concentratie variaties te simuleren met een zogenaamd atmosferisch transport model, zoals dit filmpje laat zien voor CO<sub>2</sub> [Figuur 9]. Wat je ziet is vooral de atmosferische stroming. De pulserende variatie in de tropen komt door de biosfeer die overdag CO<sub>2</sub> opneemt en 's nachts weer afgeeft. Door in te zoomen, in dit geval op de oostkust van China, zijn stedelijke CO<sub>2</sub> pluimen waarneembaar.

Het is belangrijk voor dit model dat de atmosferische stroming niet alleen realistisch is, maar ook nauwkeurig overeenkomt met meteorologische waarnemingen. Het is daardoor in staat om de weersomstandigheden te reconstrueren gedurende een periode waarin metingen werden verricht. Deze metingen worden gebruikt in combinatie met de zogenaamde inverse modellering techniek om schattingen te verkrijgen van broeikasgasemissies op mondiale, regionale, of zelfs lokale schaal.

Het werkt als volgt [zie Figuur 10]: Bestaande schattingen van emissies aan het aardoppervlak worden voorgeschreven aan een atmosferisch transport model. Hiermee vertaal je de emissies in overeenkomstige concentraties in de atmosfeer. Als de emissieschattingen overeenkomen met de werkelijke emissies, dan zijn de gesimuleerde concentraties in goede overeenstemming met de metingen. Verschillen tussen model en metingen duiden op tekortkomingen in de emissieschattingen. De inverse modellering techniek maakt gebruik van deze verschillen om de kennis van emissies te verbeteren, namelijk door de emissies zodanig aan te passen dat het model in optimale overeenstemming wordt gebracht met de waarnemingen. Het resultaat is een gecorrigeerde emissie kaart die in overeenstemming is met de al beschikbare kennis en de metingen.



**Figuur 7:** De natuurlijke terugkoppeling op antropogene CO<sub>2</sub> emissies.

Om dit goed te kunnen doen zijn veel metingen nodig. In het geval van langlevende broeikasgassen moeten de metingen ook nog heel nauwkeurig zijn, namelijk beter dan 1‰. Sinds de jaren 80 van de vorige eeuw beschikken we over een mondiaal meetnetwerk dat de vereiste nauwkeurigheid bereikt. De dekking van dit meetnetwerk is alleen wel erg beperkt. Belangrijke gebieden op aarde, zoals tropische regenwouden en boreale bossen, worden nauwelijks waargenomen.

Een veel betere dekking is te verkrijgen door satellieten uit te rusten met instrumentatie om broeikasgassen vanuit de ruimte te meten. Met deze methode kan al in een paar dagen mondiale dekking worden gehaald. Een goed voorbeeld is het TROPOMI instrument, dat grotendeels door Nederland is gefinancierd en gebouwd. Het speelde de hoofdrol in het filmpje dat voorafging aan mijn oratie. Dit instrument combineert een hoge ruimtelijke resolutie met een ongekende meetdekking. Vlak na de lancering vorig jaar oktober, leverden de eerste resultaten al direct grote opwinding op onder de betrokken wetenschappers. Die bevestigden namelijk dat er een grote stap vooruit was gezet in vergelijking met bestaande instrumentatie. Om dit enthousiasme met jullie te delen toon ik hier een voorbeeld van de door TROPOMI waargenomen variatie in koolmonoxide over Iran [zie Figuur 11].



**Figuur 8:** *Verzakking van de bodem als gevolg van dooiend permafrost.*

Koolmonoxide is een toxisch gas dat vrijkomt bij onvolledige verbranding van brandstoffen, bijvoorbeeld door de industrie, huishoudens, en het verkeer. Verschillende steden zijn zichtbaar zoals Teheran, en zelfs belangrijke verbindingswegen. De overeenkomstige modelsimulatie toont een verdeling van koolmonoxide die grotendeels overeenkomt met de metingen. Door de emissies te schalen zijn we in staat om de overeenstemming met de metingen verder te verbeteren. Zo moet de CO emissie van Teheran met ruwweg 50% verhoogd worden om het model in overeenstemming te brengen met de TROPOMI waarnemingen. Het is een prachtig voorbeeld hoe satellietdata gebruikt kunnen worden voor het verbeteren van emissieschattingen.

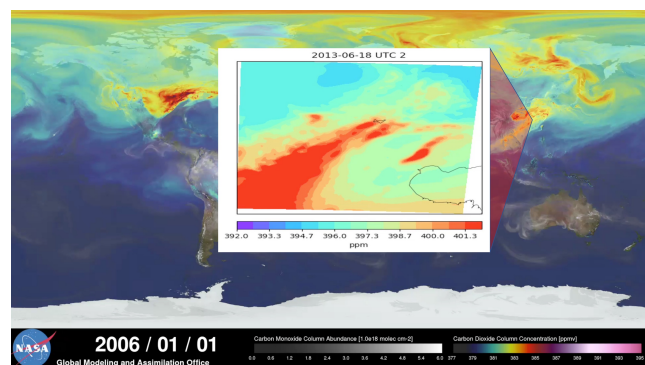
De eerste analyses van TROPOMI data lijken te bevestigingen dat de grote winst van satellietmetingen op relatief kleine ruimtelijke schalen te vinden is, namelijk de schaal van grote steden, mijnen en industriële complexen. Netwerken voor grondmetingen houden met opzet afstand van zulke grote bronnen, zodat de lucht tijd krijgt om over een groter gebied te mengen. Je wilt bijvoorbeeld niet dat je meting representatief is voor de auto die net passeert. Satellieten kennen dit probleem niet. Met de resolutie van nieuwe generatie sensoren, zoals TROPOMI, kan een hele stad en de directe omgeving ervan in kaart worden gebracht.

Door de beperkte gevoeligheid van satellietmetingen is wel een grote bron nodig, bijvoorbeeld een grote energiecentrale voor kooldioxide of een grote kolenmijn voor methaan. Gelukkig blijkt een groot aantal bronnen binnen het bereik te liggen van het TROPOMI instrument. Het zijn ook deze grote bronnen waarmee de grootste klimaatwinst te boeken is.

In plaats van koolmonoxide had ik ook een plaatje van methaan of kooldioxide kunnen kiezen. Dan was het echter wel een stuk minder duidelijk zichtbaar geweest. Dit komt omdat koolmonoxide veel eenvoudiger te meten is met satellieten dan langlevende broeikasgassen. De variaties in de concentratie van broeikasgassen zijn namelijk een stuk kleiner, veelal kleiner dan 1%. Versturende omstandigheden, zoals bewolking en lichtverstrooiing door stofdeeltjes, worden dan veel belangrijker. Iets waar mijn collega's bij SRON hard aan werken.

Behalve wetenschappelijke uitdagingen op het terrein van de metingen, zijn die er ook op het terrein van de modellen. Zoals het CO<sub>2</sub> filmpje liet zien wordt een groot deel van de gemeten variabiliteit veroorzaakt door variaties in de atmosferische stroming. Om die reden heb je een heel goed model nodig om tot betrouwbare emissieschattingen te komen. Hoewel we modellen graag de schuld geven van alles wat er misgaat, zijn ze toch ook best tot bijzondere prestaties in staat.

Figuur 12 vergelijkt het door TROPOMI waargenomen transport van koolmonoxide over Zuid Oost Azië (links) met modelberekeningen (rechts). U zult met me eens zijn dat er best veel goed gaat in dit model. Als je beter kijkt zijn er ook verschillen te zien, die wellicht zelfs informatie verschaffen over atmosferisch transport. Wie weet dragen de TROPOMI CO metingen bij aan de kennis over stroming en menging in de atmosfeer. Die informatie zou goed van pas komen bij het bestuderen van broeikasgas-metingen. Dit is één van vele voorbeelden hoe het ene gas kan helpen bij het gebruik van metingen van een ander gas. TROPOMI is bij uitstek geschikt voor het combineren van verschillende gassen, iets waar een nieuw aangestelde AIO en Postdoc mij in de komende jaren bij gaan helpen.

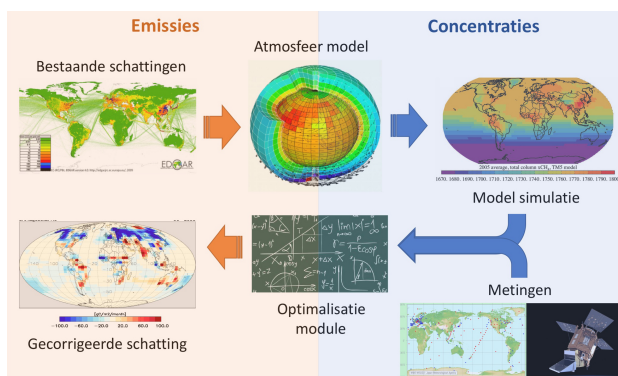


**Figuur 9:** *Modelberekening van CO<sub>2</sub> in de atmosfeer, mondiaal en ingezoomd op de oostkust van China.*

Recentelijk is de ontwikkeling van modellen in een stroomversnelling beland, vooral wat betreft de resolutie waarop kan worden gerekend. Zo zet Nederland in op de ontwikkeling van een nieuw hoge resolutie model binnen het onlangs door NWO gesubsidieerde infrastructuurproject Ruisdael. De verspreiding van emissies van lokale bronnen kan daarmee berekend worden met een resolutie van enkele tientallen meters, in plaats van een paar kilometer tot nu toe.

Deze ontwikkeling wordt ondersteund door de aanhoudende groei in beschikbare rekenkracht, die door veel modellen nog steeds onvoldoende wordt benut. En dat zal moeten, aangezien de gestaag groeiende stroom data van satellieten vraagt om efficiënte methodes om data te verwerken en de bruikbare informatie te extraheren.

Hierin is mijn vakgebied zeker niet uniek. We leven in een wereld die steeds rijker wordt aan data, en waarin grote investeringen worden gedaan in technieken om met deze 'big data' om te gaan. De toepassing van datamining en machine-learning technieken op atmosferische satellietmissies is tot nu toe beperkt, maar dat zal vrijwel zeker gaan veranderen. Satellietinstrumenten zoals TROPOMI bieden een unieke mogelijkheid om in dit onontgonnen terrein te pionieren.



**Figuur 10:** Schematische weergave van inverse modellering van broeikasgasemissies.

Waar inverse modellering van broeikasgasemissies voorheen vooral ten dienste stond van een beter begrip van natuurlijke processen, zoals de koolstofcyclus-klimaat terugkoppelingen waar ik het over had, is het accent nu aan het verschuiven in de richting van het kwantificeren van emissies door menselijke activiteiten. De toepassing van TROPOMI op CO emissies uit Iraanse steden was daar al een duidelijk voorbeeld van. Daarmee komt een nieuw toepassingsgebied binnen bereik, namelijk die van het monitoren van maatregelen om broeikasgasemissies te reduceren. Tijdens de klimaatconferentie van Parijs is afgesproken dat overheden zich inzetten om de mondiale opwarming aan het eind van deze eeuw te beperken tot maximaal 2 en bij voorkeur 1.5 °C.

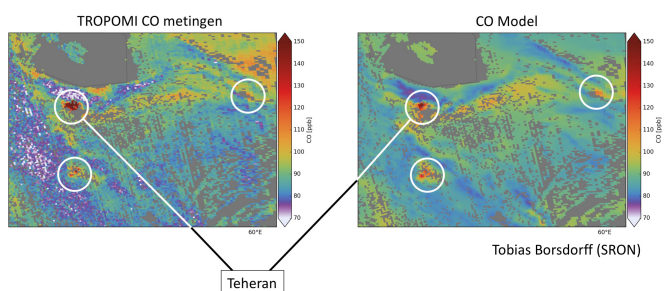
De geplande emissiereducties op de korte termijn zijn daarbij vastgelegd in zogenaamde NDC's, wat staat voor National Determined Contributions. Het zijn voornemens van overheden om emissies van broeikasgassen te reduceren, die vanaf 2025 in 5-jaarlijkse intervallen worden geëvalueerd. Zo staat er in de NDC voor de Europese Unie dat in 2030 een emissiereductie moet zijn bereikt van minstens 30% ten opzichte van 1990. De Nederlandse overheid overtreft deze ambitie met een reductie van 49% in plaats van 30%. De NDC van China is in Chinese karakters, maar het belooft de CO<sub>2</sub> efficiëntie van de productie met 60 tot 65% te verbeteren, waarbij 34% naar eigen zeggen intussen al is bereikt. Het zou nuttig zijn om op een onafhankelijke manier te kunnen toetsen of dat daadwerkelijk zo is.

In Figuur 13 zijn de routes te zien die naar 1.5°C en 2 °C opwarming leiden en die ingezet zijn met de huidige NDC's. Het is duidelijk dat een grotere emissiereductie nodig zal zijn om de opwarming tot 1.5°C te beperken; de gele curve moet namelijk richting de groene. Dit vergt een aanzienlijk grotere inspanning dan nu in de NDC's wordt beloofd. Naarmate de beloftes ambitieuzer worden, neemt ook de wens toe om deze op een onafhankelijke manier te kunnen toetsen.

Sinds het Kyotoverdrag rapporteren de ontwikkelde landen hun emissies aan de United Nations Framework Convention on Climate Change, beter bekend als de UNFCCC. Hiervoor worden gestandaardiseerde rekenmethodes gebruikt van het IPCC. Deze jaarlijkse emissierapportages zijn gebaseerd op statistieken, onder andere over energiegebruik en landbouwproductie. Of deze papieren werkelijkheid overeenkomt met de

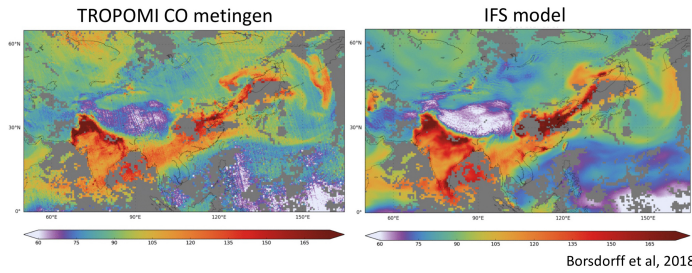
toename van broeikasgassen in de atmosfeer is maar in beperkte mate bekend. Tot nu toe is er geen formele rol voor het gebruik van atmosferische metingen in dit proces.

De inverse modellering techniek is de aangewezen methode om dat te gaan doen. Het is alleen wel een grote uitdaging om de nauwkeurigheid te bereiken die nodig is om emissiereducties per land vast te stellen van hooguit enkele procenten per jaar. In regio's met een goede beschikbaarheid van metingen, zoals het ICOS meetnetwerk in Europa, komt het



**Figuur 11:** TROPOMI metingen over Iran (links) en overeenkomstige model berekeningen (rechts)





**Figuur 12:** Een vergelijking tussen TROPOMI waargenomen (links) en model berekende (rechts) CO concentraties over Zuidoost Azië.

satellieten, gericht op lancering in 2025. Daarnaast is begonnen aan de bouw van een pre-operationeel modelsysteem, dat gebruik maakt van deze en andere metingen om nationale broeikasgasemissies te monitoren. Daarmee kunnen overheden de inverse modellering techniek in de toekomst zelf toepassen, wat tot nu toe vrijwel alleen door wetenschappers wordt gedaan. Mijn werk aan de VU, in samenwerking met SRON en andere nationale en internationale onderzoeksgroepen, levert een directe bijdrage aan deze ontwikkelingen.

Het vooruitzicht op een Europees monitoringsysteem voor broeikasgassen dat emissierapportages mondiaal zou kunnen controleren heeft wel een risico, namelijk dat het buiten de EU als een bedreiging wordt gezien. Om die reden moet dit systeem zo transparant mogelijk worden opgezet, met vrije toegang voor iedereen. Ik ben betrokken bij een initiatief van de Wereld Meteorologische Organisatie om kennis te verstrekken aan overheden die de methode zelf toe willen passen, maar niet over de benodigde expertise beschikken. In Zwitserland en Engeland worden atmosferische metingen inmiddels al gebruikt voor hun eigen nationale emissierapportages. Deze meer geïntegreerde methode draagt hopelijk bij aan de acceptatie van de methode. Het levert mogelijk ook veel nieuwe metingen op in landen die dit voorbeeld willen volgen, maar nu nog geen eigen meetprogramma hebben.

Het klimaatprobleem is anders dan de zure regen problematiek en het gat in de ozonlaag, waarmee ik mijn rede begon, vanwege schaal van het probleem, niet alleen in ruimte maar vooral ook in de tijd. Desondanks is er reden tot optimisme. Het Parijs akkoord heeft namelijk al belangrijke veranderingen in gang weten te zetten. Wie had zich een aantal jaar geleden voor kunnen stellen dat de Nederlandse overheid milieumaatregelen voor zou stellen met een implementatietermijn die botst met al geplande projecten in de bouwsector? In ons land van compromissen leidt zo iets tot uitstel, maar de notie van urgentie heeft de politiek gelukkig wel bereikt. Houdt die urgentie stand of wordt het bij de volgende economische crisis alweer overvleugeld door andere prioriteiten? Zijn we in staat om een structurele verandering teweeg te brengen in het denken over duurzaamheid, die standhoudt op de tijdschaal die nodig is om het mondiale klimaat op een stabiele koers te brengen? Daarvoor is in mijn optiek innovatie nodig op veel verschillende terreinen. Ik heb persoonlijk niet de illusie dat een groot deel van de bevolking straks besluit om niet meer te gaan vliegen vanwege het klimaat, tenzij de prijs behoorlijk wordt verhoogd.

Klimaatsoevereïteit is misschien haalbaar voor een korte periode, zoals een facebook oproep voor een autovrije dag, maar wil dit standhouden op de lange termijn dan zijn er duurzame alternatieven nodig zoals bijvoorbeeld elektrisch vliegen, waarmee intussen serieuze vorderingen worden geboekt. Net als bij de bestrijding van CFK's om de ozonlaag te redden, hebben de duurzame alternatieven wellicht verscholen milieu-consequenties. Zo vraag ik me bijvoorbeeld af wat de consequentie is van het grootschalig gebruik van batterijen of koelvloeistoffen in warmtepompen. Het is aan de wetenschap om alert in te spelen op nieuwe ontwikkelingen en de opgedane kennis tijdig te communiceren.

Naast het doen van onderzoek, hoop ik een bijdrage te leveren aan het oplossen van het klimaatprobleem door het geven van onderwijs. We moeten de volgende generatie toerusten met kennis en het gereedschap dat nodig is om het schip op koers te houden. Besef van het belang van duurzame ontwikkeling is

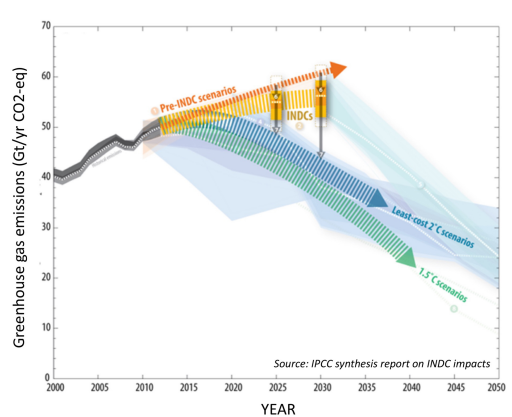
monitoren van de meerjarige trend wel binnen bereik. Het Nederlandse voornemen tot halvering van de CO<sub>2</sub> emissies in een tijdsbestek van een paar decennia is op termijn zeker waarneembaar, maar niet al na een jaar.

Sinds de succesvolle klimaatconferentie van Parijs heeft de Europese Unie belangrijke stappen vooruitgezet met het monitoren van broeikasgassen. Zo is de ontwikkeling gestart van een Europese constellatie van CO<sub>2</sub>

satellieten, gericht op lancering in 2025. Daarnaast is begonnen aan de bouw van een pre-operationeel modelsysteem, dat gebruik maakt van deze en andere metingen om nationale broeikasgasemissies te monitoren. Daarmee kunnen overheden de inverse modellering techniek in de toekomst zelf toepassen, wat tot nu toe vrijwel alleen door wetenschappers wordt gedaan. Mijn werk aan de VU, in samenwerking met SRON en andere nationale en internationale onderzoeksgroepen, levert een directe bijdrage aan deze ontwikkelingen.

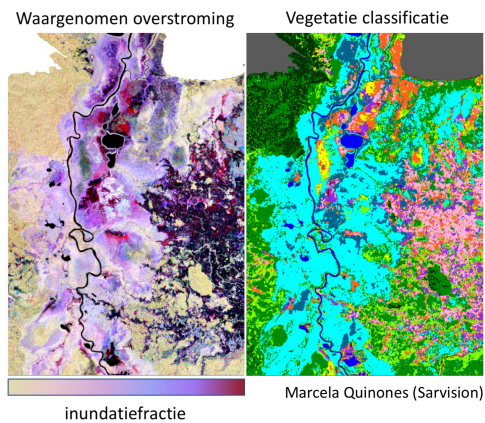
Het vooruitzicht op een Europees monitoringsysteem voor broeikasgassen dat emissierapportages mondiaal zou kunnen controleren heeft wel een risico, namelijk dat het buiten de EU als een bedreiging wordt gezien. Om die reden moet dit systeem zo transparant mogelijk worden opgezet, met vrije toegang voor iedereen. Ik ben betrokken bij een initiatief van de Wereld Meteorologische Organisatie om kennis te verstrekken aan overheden die de methode zelf toe willen passen, maar niet over de benodigde expertise beschikken. In Zwitserland en Engeland worden atmosferische metingen inmiddels al gebruikt voor hun eigen nationale emissierapportages. Deze meer geïntegreerde methode draagt hopelijk bij aan de acceptatie van de methode. Het levert mogelijk ook veel nieuwe metingen op in landen die dit voorbeeld willen volgen, maar nu nog geen eigen meetprogramma hebben.

Het klimaatprobleem is anders dan de zure regen problematiek en het gat in de ozonlaag, waarmee ik mijn rede begon, vanwege schaal van het probleem, niet alleen in ruimte maar vooral ook in de tijd. Desondanks is er reden tot optimisme. Het Parijs akkoord heeft namelijk al belangrijke veranderingen in gang weten te zetten. Wie had zich een aantal jaar geleden voor kunnen stellen dat de Nederlandse overheid milieumaatregelen voor zou stellen met een implementatietermijn die botst met al geplande projecten in de bouwsector? In ons land van compromissen leidt zo iets tot uitstel, maar de notie van urgentie heeft de politiek gelukkig wel bereikt. Houdt die urgentie stand of wordt het bij de volgende economische crisis alweer overvleugeld door andere prioriteiten? Zijn we in staat om een structurele verandering teweeg te brengen in het denken over duurzaamheid, die standhoudt op de tijdschaal die nodig is om het mondiale klimaat op een stabiele koers te brengen? Daarvoor is in mijn optiek innovatie nodig op veel verschillende terreinen. Ik heb persoonlijk niet de illusie dat een groot deel van de bevolking straks besluit om niet meer te gaan vliegen vanwege het klimaat, tenzij de prijs behoorlijk wordt verhoogd.



**Figuur 13:** Een vergelijking van de emissie scenario's die naar Parijse klimaat doelen leiden en de koers die ingezet is met de (I)NDCs.





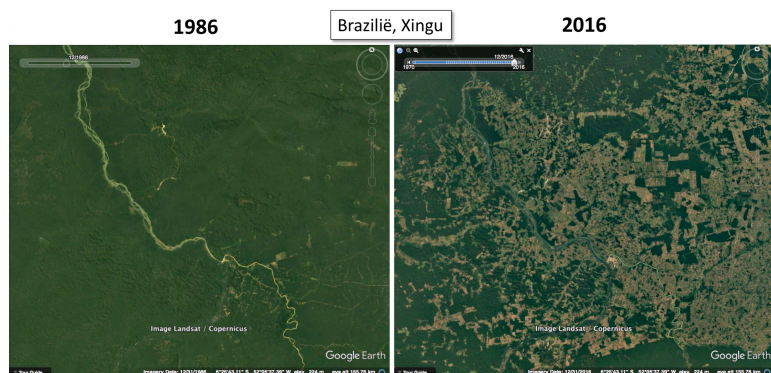
**Figuur 14:** Het overstromingsgebied van de Atrato rivier, Columbia, op basis van ALOS PALSAR waarnemingen.

daarvoor essentieel. De recente interviews onder 18-jarigen naar hun mening over onder andere klimaatverandering deed mij me realiseren dat er nog veel werk aan de winkel is. Een nieuw element in de gereedschapskist van aardwetenschappenstudenten zijn technieken om efficiënt om te kunnen gaan met het groeiende aanbod aan data. De wereld van satellietmetingen heeft legio aansprekende toepassingen voor het gebruik van moderne programmeertechnieken en de eerdergenoemde datamining en artificiële intelligentie technieken. Hiermee is op een leuke manier veel te leren. Ik heb met verbazing geconstateerd die ik op de middelbare school, we hebben het over de jaren 80 van de vorige eeuw, meer les in informatica heb gehad dan mijn kinderen nu krijgen. Ik heb onlangs twee prima promovendi weten te vinden om mij in de komende jaren te helpen bij mijn onderzoek, maar ze komen niet uit Nederland. Dit is geen toeval, naar mijn mening, maar een symptoom van onderwaardering voor de gereedschapskist die nodig is om toekomstige uitdagingen in het gebruik van data aan te kunnen gaan. Moeten kinderen nog vaker achter de computer? Wat mij betreft niet, maar wel op een andere manier.

Mijn verhuizing naar de VU biedt een aantal interessante mogelijkheden voor discipline overschrijdende samenwerking. Eén daarvan, die ik speciaal wil noemen, is satelliet remote sensing van het landoppervlak. Het lijkt vanzelfsprekend om de oorzaken van veranderingen in de atmosferische samenstelling te zoeken op het land. Dat gebeurt ook, maar desalniettemin blijven veel mogelijkheden tot kruisbestuiving tussen atmosfeer en land remote sensing grotendeels onbenut.

Het voorbeeld dat ik hier laat zien [Figuur 14] is afkomstig van de ALOS PALSAR L band radar en toont het overstromingsgebied van de Atrato rivier in Colombia. Overstromingsgebieden van tropische rivieren zijn een belangrijke bron van methaan. Variaties in overstroming zijn gerelateerd aan variaties in methaan emissies, op een manier die nog slecht bekend is. Bijzonder aan deze satelliet is dat het door bewolking en door het bladerdak van bomen heen kan kijken. Het is daarmee bij uitstek geschikt om ondergelopen tropische bossen in kaart te brengen. Daarnaast levert het prachtige plaatjes op, die wat mij betreft zo in een museum voor moderne kunst zouden kunnen.

Het tweede voorbeeld [Figuur 15] is er één die iedereen eenvoudig thuis na kan maken. Het complete Landsat archief is publiek beschikbaar en wordt o.a. gebruikt door Google Earth. Je kunt historische kaarten oproepen en zo eenvoudig nagaan hoe het landoppervlak in de loop van decennia is veranderd. Dit voorbeeld toont de voortschrijdende ontbossing in de oostelijke Amazone in 30 jaar tijd. Er is niet veel verbeelding voor nodig om in te zien dat dit soort datasets van onschatbare waarde zijn voor het bestuderen van de menselijke invloed op het klimaat.



**Figuur 15:** Ontbossing in de oostelijke Amazone gedurende de afgelopen 30 jaar, waargenomen met Landsat en beschikbaar gesteld door Google Earth.

Tot besluit ben ik een aantal mensen dank verschuldigd voor de kans die mij in mijn nieuwe functie wordt geboden, en het in mij gestelde vertrouwen. De middelen die voor deze positie beschikbaar zijn, komen uit het Amsterdam Academic Alliance programma; een samenwerking tussen VU en UvA. Daarvoor gaat aan VU-zijde mijn dank uit naar het college van bestuur van de VU en het bestuur van de bètafaculteit die dit mogelijk maakten. Daarnaast wil ik de UvA bedanken, in het bijzonder de decaan van de faculteit der Natuurwetenschappen Peter van Tienderen, voor zijn ondersteuning.

Zoals een aantal van jullie zich zal herinneren, kwam deze positie tot stand in een roerige periode waarin de verhuizing van SRON op het spel stond. Ondanks de onzekere situatie is toen besloten om desalniettemin door te zetten. Ik ben met de kennis van nu, meer dan destijds, overtuigd dat dit de juiste keuze was. Mijn grote dank gaat daarvoor uit naar de betrokkenen: Han Dolman, Guido van der Werf en Wim van Westrenen aan VU-zijde, en Avri Selig, Ilse Aben, en Rens Waters aan de zijde van SRON. De positie was en is bedoeld ter ondersteuning van de samenwerking tussen VU en SRON, waarvoor ik zal me blijven inzetten, ook na de geplande verhuizing van SRON naar Leiden.

Verder wil ik een aantal andere collega's bedanken die mij geholpen hebben de benodigde kennis en vaardigheden te vergaren, die nodig zijn om een bijdrage te kunnen leveren aan dit fascinerende vakgebied. Dit zijn er eigenlijk te veel om op te noemen, maar dat geldt voor een paar in het bijzonder, waaronder de eerdergenoemde Peter Bultjes voor zijn inspirerende college atmosferische chemie, co-promotor Frank Dentener en promotor Jos Lelieveld voor de begeleiding van mijn promotieonderzoek. Ik herinner me mijn promotietijd als een bijzonder leerzame periode, in een groep met veel positieve energie en wetenschappelijke dynamiek. Maarten Krol, Thomas Röckmann en de andere collega's aan het IMAU, bedankt voor de prettige samenwerking en belangrijke ondersteuning van mijn onderzoek. Het concept van de bring-your-own party met live muziek verdient zeker navolging. Dank ook aan mijn huidige collega's aan de VU en SRON voor de prettige sfeer en samenwerking. Met de recente versterking in de vorm van nieuwe AIO's en postdocs, zie ik toekomst vol vertrouwen tegemoet.

Zo kan ik nog even doorgaan – vergeef me wie ik hier onbenoemd moet laten, waaronder veel mensen in het buitenland. Sandra, Anouk en Tessa verdienen hier zeker een speciale vermelding voor hun niet aflatende inspanning om mij met twee benen terug naar aarde te krijgen. Zo merkte Tessa onlangs op dat ik zo helemaal op Tita tovenaars lijk, waarbij ik me druk maakte om wat ze precies met het woord 'helemaal' bedoelde. Tot slot wil ik mijn dank uitspreken aan mijn ouders, zonder wiens goede zorg ik hier zeker niet had gestaan. Ik ben blij en oprecht dankbaar dat jullie hier vandaag beide bij aanwezig konden zijn.

Ik heb gezegd.

## Referenties

Borsdorff, T., Aan de Brugh, J., Hu, H., Aben, I., Hasekamp, O., & Landgraf, J. (2018). Measuring carbon monoxide with TROPOMI: First results and a comparison with ECMWF-IFS analysis data. *Geophysical Research Letters*, 45, 2826–2832. <https://doi.org/10.1002/2018GL077045>.

Lajtha, K. & Jones, 2013, Trends in cation, nitrogen, sulfate and hydrogen ion concentrations in precipitation in the United States and Europe from 1978 to 2010: a new look at an old problem, *J. Biogeochemistry*, 116: 303. <https://doi.org/10.1007/s10533-013-9860-2>.

Lacis, A.A., J.E. Hansen, G.L. Russell, V. Oinas, and J. Jonas, 2013: The role of long-lived greenhouse gases as principal LW control knob that governs the global surface temperature for past and future climate change. *Tellus B*, 65, 19734, doi:10.3402/tellusb.v65i0.19734.

UNFCCC, 2016, Aggregate effect of the intended nationally determined contributions: an update, Synthesis report by the secretariat, FCCC/CP/2016/2, Conference of the Parties, 22th session, Marrakech, Morocco.