

Het gebruik van satellietmetingen voor het monitoren van stikstof in Nederland

Whitepaper

Samenvatting

De monitoring van de twee hoofdrolspelers in de stikstofproblematiek, de gassen ammoniak (NH_3) en stikstofdioxide (NO_2) is van groot belang om de gevolgen voor de natuur, de mens en het klimaat in kaart te brengen. In Nederland is deze monitoring momenteel gebaseerd op (1) meetnetwerken die de concentraties meten aan de grond, (2) schattingen van de uitstoot op basis van geregistreeerde emissiegetallen, in combinatie met (3) modellen om de hoeveelheid depositie te berekenen. Er wordt hierbij nog geen operationeel gebruik gemaakt van satellietmetingen die informatie geven over atmosferische kolommen NO_2 en NH_3 .

In dit whitepaper betogen we dat bestaande en toekomstige satellieten nieuwe kennis toevoegen aan het bestaande stikstof instrumentarium in Nederland. We raden aan om verder te onderzoeken of, en hoe satellietwaarnemingen toegevoegd kunnen worden aan het meet- en modelinstrumentarium. Toepassingen zijn het evalueren en schatten van de emissies, het verbeteren van de ruimtelijke dekking van de metingen, het toetsen en verbeteren van modellen en het in kaart brengen van de onzekerheden. Dergelijke toepassingen zijn tegen relatief geringe meerkosten te realiseren. Om optimaal gebruik te kunnen maken van satellietmetingen is het van belang dat bestaande methoden verder ontwikkeld worden en onzekerheden in de satellietgegevens goed in kaart gebracht, en waar mogelijk verbeterd worden.

Satellietmetingen van ammoniak en stikstofoxiden dragen op meerdere manieren bij aan de kennis van stikstof in Nederland. Omdat satellieten de totale hoeveelheid van een stikstofcomponent in een hele kolom in kaart brengen, zijn directe schattingen van de uitstoot mogelijk die gebaseerd zijn op metingen in plaats van modelberekeningen en rapportages. Daarnaast meten satellieten de pluimen van stikstof in de lucht vanaf de bron, waarmee we de modelbeschrijving van het transport en de chemische omzetting in de lucht toetsen.

Er zijn meer voorbeelden waarom het gebruik van satellietgegevens interessant is, naast de metingen gedaan vanaf de grond. De gegevens zijn vaak beschikbaar binnen een paar uur na de meting, wat een snelle schatting van de uitstoot mogelijk maakt. De satelliet levert tijdsinformatie, zoals variatie in concentratie. Abrupte toenames en afnames worden direct waargenomen, zoals tijdens het stilvallen van het verkeer tijdens de coronacrisis of bij grote bosbranden. Trends en variatie in de uitstoot als gevolg van beleid en reductiemaatregelen kunnen van jaar tot jaar worden waargenomen, waarbij uiteraard, net als bij grondmetingen, wel rekening moet worden gehouden met de invloed van de weersomstandigheden. Satellieten meten overall, ook op plekken waar het grondnetwerk geen metingen heeft. Concentraties aan de grond zijn te schatten uit satellietmetingen met indirecte technieken die gebruik maken van modelsimulaties, of machine learning in combinatie met

grondmetingen. Satellieten meten meerdere gassen tegelijkertijd wat extra informatie over bronnen oplevert. Er zijn ook waarnemingen van ecologische effecten, zoals het chlorofyl gehalte in zeewater en stikstofgehalten in bladeren. De beschikbaarheid van satellietgegevens in de nabije toekomst is gegarandeerd door langdurig lopende internationale operationele satellietprogramma's zoals het Europese Copernicus, en de satellietgegevens zijn vrij beschikbaar na lancering.

Satellietgegevens zijn een toevoeging op het huidige instrumentarium, maar er zijn ook beperkingen. Zo meten satellieten niet direct de concentraties aan de grond, essentieel voor het monitoren van luchtkwaliteit en voor het kwantificeren van stikstofdepositie. De huidige satellieten meten maximaal 1 of 2 keer per dag op een vaste overkomsttijd en bij onbewolkt weer, en het ruimtelijk oplossend vermogen is relatief laag, tot 5 bij 5 km² gebiedsgemiddelden. Satellieten kunnen maar een beperkt aantal componenten met voldoende kwaliteit waarnemen (waaronder wel de belangrijke gassen NO₂ en NH₃). De satellietgegevens zijn dus aanvullend, en een combinatie met metingen aan de grond zal nodig blijven.

Toekomstige satellietmissies zullen de huidige mogelijkheden om emissies te schatten en modellen te verbeteren sterk uitbreiden. Met name de geostationaire satellieten (de MTG-S missie met de Sentinel-4 en IRS aan boord, lancering 2025) geven de mogelijkheid om elk uur metingen te doen, in plaats van 1 keer per dag. Daarnaast zullen toekomstige missies een veel beter ruimtelijk oplossend vermogen hebben. De TANGO-missie, geplande lancering 2026, levert metingen met een oplossend vermogen van 300m bij 300m. Hierdoor zal de mogelijkheid om individuele bronnen te identificeren en te kwantificeren sterk verbeterd. Nederland speelt in de ontwikkeling van deze nieuwe instrumenten een prominente rol wereldwijd.

Reactief stikstof

De atmosfeer bestaat voor 80% uit stikstofmoleculen, N₂. Dit is niet de stikstof waar we het hier over hebben. Van belang is reactief stikstof, verbindingen tussen stikstofatomen N en zuurstof O en/of waterstof H. Reactief stikstof¹ in kleine hoeveelheden is een essentieel onderdeel in de voeding voor plant, dier en mens, maar teveel reactief stikstof is slecht voor de natuur, voor de gezondheid en heeft ook effecten voor het klimaat. Het veroorzaakt de stikstofproblematiek.

De twee belangrijke gassen in de stikstofproblematiek zijn ammoniak, NH₃, en stikstofoxiden, waaronder stikstofmonoxide, NO, en stikstofdioxide, NO₂. De som van deze gassen NO en NO₂ noemen we NO_x. Deze gassen slaan neer op de grond (depositie), deels dicht bij de bron en deels worden ze getransporteerd over lange afstanden, vaak meer dan 100 km. Concentraties in de atmosfeer en de depositie van deze gassen hebben meerdere gevolgen, veelal negatief:

¹ Reactief stikstof zijn alle geoxideerde en gereduceerde verbindingen van stikstof met uitzondering van N₂.

- Ze leiden tot **vermesting en verzuring** van de bodem, en tot een **reductie van de biodiversiteit** ten voordele van een beperkt aantal stikstof minnende planten.
- Ze leiden tot een **slechte luchtkwaliteit** en **gezondheidsproblemen** bij de mens. De gassen worden in de lucht omgezet naar fijnstof. De concentraties NO₂, ozon (mede gevormd door de aanwezigheid van NO₂) en fijnstof zijn alle drie onderdeel van Europese wetgeving.
- Deels in de lucht (NO_x) en in de bodem (zowel NH₃ als NO_x) kan N worden omgezet naar nitraat (NO₃), ammonium (NH₄) en lachgas (N₂O). Nitraat (NO₃) met verzuring als gevolg en de uitspoeling ervan kan een negatieve invloed hebben op de **kwaliteit van het oppervlaktewater**. Lachgas speelt een rol in **de opwarming van het klimaat**. Lachgas is een sterk broeikasgas.
- Stikstofoxiden spelen een rol bij de vorming van ozon en bepalen mede de **verblijftijd van methaan** in de atmosfeer. Methaan is ook een prominent broeikasgas.

Het is daarom van belang de concentraties en depositie van reactief stikstof te reduceren².

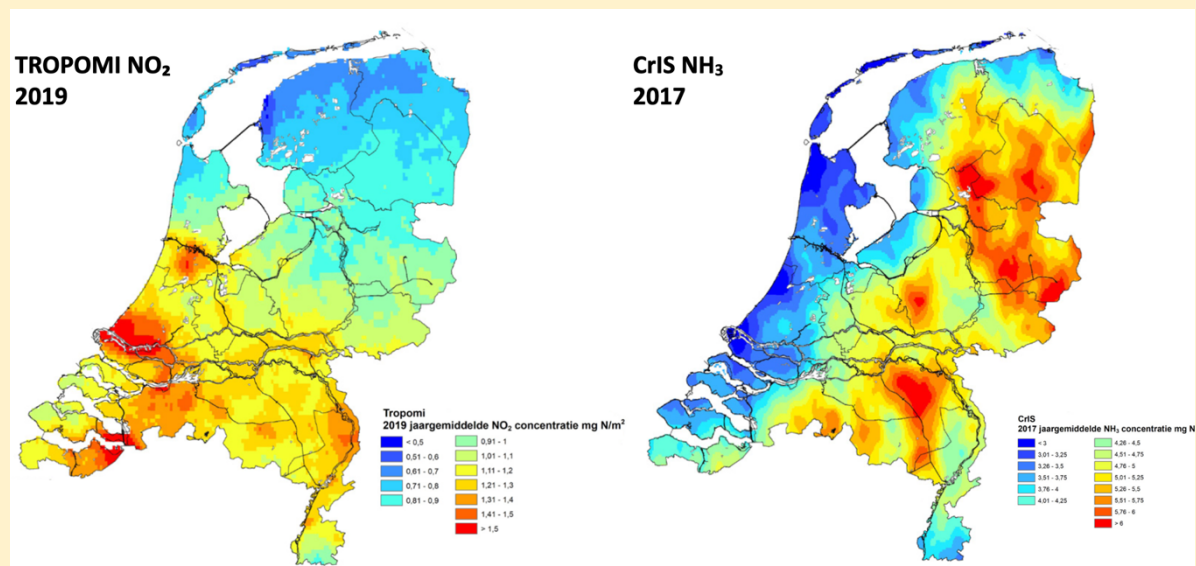
Stikstof in Nederland

Op 29 mei 2019 heeft de Raad van State geoordeeld dat de vergunningverlening van stikstof uitstotende activiteiten op basis van de Nederlandse Programma Aanpak Stikstof niet heeft geleid tot een verbetering van de stikstof-druk op de Natura 2000-gebieden in Nederland. Als gevolg hiervan kunnen veel vergunningen voor nieuwe activiteiten, bijvoorbeeld in de bouw, niet meer gegeven worden, en was stikstof opeens een groot politiek thema.

Vanwege het grote maatschappelijke belang is het cruciaal om stikstof in detail te monitoren. Het gaat er daarbij om zo goed mogelijk te meten en schatten hoeveel er wordt uitgestoten, hoeveel stikstof er in de lucht zit, en hoeveel er neerslaat op met name de Natura 2000-gebieden, hoeveel druk nieuwe economische activiteiten veroorzaken voor de natuur, en hoeveel er de landsgrenzen passeert. Met name de modellen liggen hierbij onder het vergrootglas. Het gebruik maken van een diversiteit van verschillende soorten metingen is hierbij cruciaal om meerdere aspecten van de modellen in detail te toetsen, onzekerheden te reduceren en de geloofwaardigheid van de modelberekeningen te verhogen. Met de metingen kunnen vervolgens de consequenties van nieuw beleid in de komende jaren gecontroleerd worden.

² Jan Willem Erisman ; Wim De Vries, Stikstof: De sluipende effecten op natuur en gezondheid, Uitgeverij Lias B.V., 2021.

Kader I: Stikstof in Nederland waargenomen vanuit de ruimte



De gassen NH₃ en NO₂ worden beide gemeten vanuit de ruimte door satellietinstrumenten. De kaart links toont de concentratie van stikstofdioxide (NO₂), gemiddeld over het jaar. Het jaar 2019 is hier genomen als voorbeeld. De kaart rechts toont de jaargemiddelde ammoniak (NH₃) concentratie in 2017. Opvallend is het grote verschil tussen beide gemeten verdelingen. Ammoniak vinden we voornamelijk in het oosten en zuiden van het land. De grootste bron hier is de veehouderij en de toepassing van mest. Stikstofdioxide concentraties zijn vooral hoog in het westen van het land. De grootste bronnen zijn het wegverkeer, de industrie, de haven van Rotterdam, scheepvaart en luchtvaart (Schiphol). Verder zien we de invloed van Vlaanderen en de haven van Antwerpen op de hoeveelheid NO₂ in het zuiden, de veeteelt in Duitsland op de hoeveelheid NH₃ in het noordoosten, en vervuiling van het Duitse Roergebied in Noord-Limburg voor NO₂ in Limburg. Merk op dat Nederland ook een exporteur is van atmosferische NH₃ en NO₂, dus onze burens hebben ook last van onze uitstoot.

Behalve de brongebieden laat de kaart ook zien hoe de gassen meegenomen worden door de wind, als pluimen van vervuiling, tot afstanden van zelfs meer dan 100 km, voordat het reactief stikstof neerslaat op de grond. De jaarkaart toont dus een gemiddelde over alle verschillende windrichtingen en afstanden vanaf de bron waarover NH₃ en NO₂ zijn getransporteerd.

De NO₂ kaart toont de concentratiemetingen van het TROPOMI instrument op de Sentinel-5P satelliet (bron: ESA/EU Copernicus, KNMI). De ammoniak kaart is op basis van metingen van het CrIS instrument op de Suomi-NPP satelliet (bron: NASA/NOAA, ECCC Canada, TNO).

Het adviescollege Meten en Berekenen Stikstof³ (de commissie Hordijk) heeft in haar rapport verbetervoorstellen gedaan voor de monitoring en modellering van stikstof in Nederland. Een van de voorstellen is om in Nederland gebruik te maken van de beschikbare satellietmetingen (zie kader I), omdat NO₂ en NH₃ beide waargenomen worden vanuit de ruimte. Een ander voorstel is om een nationaal

³ Meer meten, robuuster rekenen, Eindrapport van het Adviescollege Meten en Berekenen Stikstof, 15 juni 2020.

Kader 2: Nationaal Kennisprogramma Stikstof

Het Nationaal Kennisprogramma Stikstof (NKS) is door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) opgestart met als doel de stikstofmetingen en -berekeningen in Nederland verder te ontwikkelen en verbeteren. In reactie op het rapport van de commissie Hordijk wordt binnen het SAGEN project van het NKS onderzocht wat de toegevoegde waarde van satellietwaarnemingen is voor het schatten van de uitstoot van ammoniak en stikstofoxiden, voor het toetsen van de modellen en voor het berekenen van de stikstofdepositie op Nederlandse natuurgebieden. Verder wordt gekeken of het gebruik van meerdere modellen een betere kijk geeft op onzekerheden en de berekeningen kan verbeteren.

Het onderzoek wordt uitgevoerd door een consortium van TNO, CML (Centrum voor Milieuwetenschappen van de Universiteit Leiden), WUR (Wageningen University & Research), KNMI (Koninklijk Meteorologisch Instituut) en RIVM (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu).

onderzoeksprogramma in te richten waarbij de in Nederland beschikbare kennis bij meerdere onderzoeksinstituten en bij de universiteiten wordt ingezet, met een goede internationale inbedding.

Uitgaande van deze adviezen is eind 2022 een onderzoeksprogramma van start gegaan, SAGEN genaamd, als onderdeel van het Nationaal Kennisprogramma Stikstof (NKS) van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV), zie kader 2. Onderdeel van dit NKS is een studie naar het gebruik van satellietgegevens.

Monitoring van stikstof in Nederland

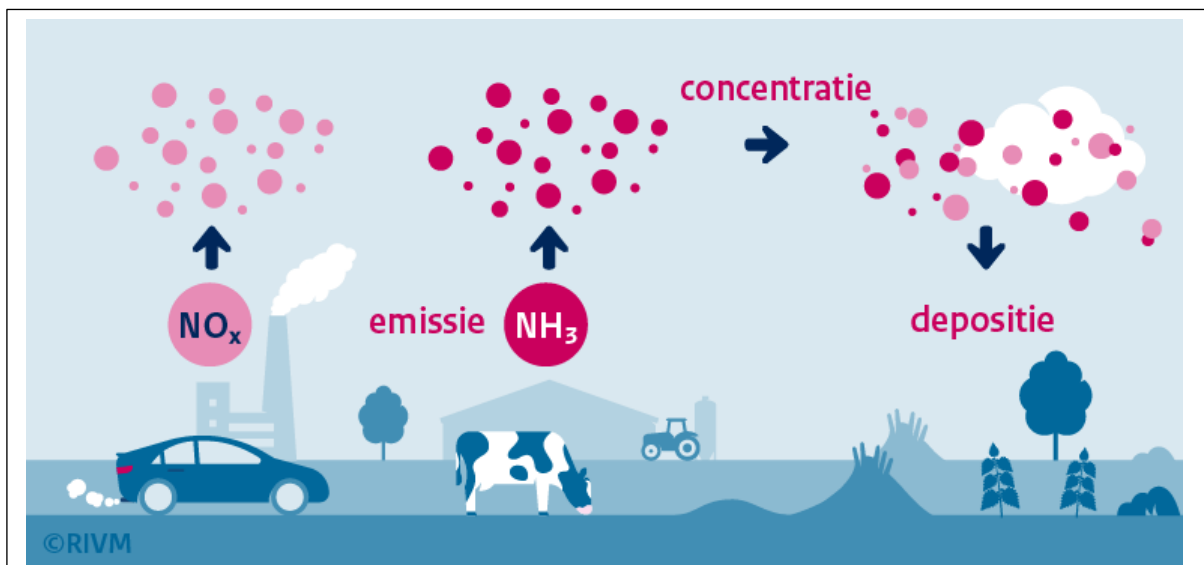
In Nederland brengen we reactief stikstof en stikstofdepositie op natuurgebieden in kaart op basis van drie elementen:

1. Schattingen (voor een/het grootste deel gebaseerd op metingen) van de hoeveelheid uitstoot.
2. Computermodellen voor de verspreiding, chemische omzetting en depositie van NH_3 en NO_2 .
3. Metingen van concentraties van NH_3 , NO_2 en aerosolen aan de grond, van de chemische samenstelling van de neerslag en metingen van de droge depositie op een aantal locaties in Nederland.

Er wordt op dit moment nog geen operationeel gebruik gemaakt van satellietgegevens.

De uitstoot.

In Nederland is de Emissieregistratie (www.emissieregistratie.nl) verantwoordelijk voor het in kaart brengen van de hoeveelheid stikstof (en een groot aantal andere



Figuur 1: De uitstoot van NH_3 en NO_x door bronnen zoals landbouw, industrie en verkeer leiden tot verhoogde concentraties reactief stikstof in de lucht. Deze concentraties worden meegenomen door de wind, en worden omgezet naar andere moleculen of fijnstof door chemische reacties. Uiteindelijk slaat het reactief stikstof neer op de grond, deels in natuurgebieden. Dit neerslaan gebeurt opgelost in de regen (natte depositie), of door contact met de bodem of vegetatie (droge depositie). De modellen beschrijven al deze processen zo goed mogelijk en geven uiteindelijk een schatting van de hoeveelheid depositie.

stoffen) die door verschillende bronnen wordt uitgestoten. De Emissieregistratie berekent de uitstoot elk jaar opnieuw en maakt voor de grotere bronnen gebruik van aangeleverde bedrijfsgegevens. Het verzamelen van al die informatie is een tijdrovende klus, en emissiegegevens komen meestal met een vertraging van enkele jaren beschikbaar. De rapportages worden gebruikt voor nationaal beleid en om te controleren of Nederland voldoet aan internationale verdragen rond luchtvervuiling, natuur, klimaat en het milieu. De uitstoot van het wegverkeer, als voorbeeld, kan worden berekend door voor ieder type voertuig de emissie te bepalen, en dit te vermenigvuldigen met het aantal gereden kilometers met dit type voertuig in Nederland. Deze totale jaarlijkse uitstoot wordt verdeeld over het land met behulp van de wegenkaarten en verkeersintensiteit. Dergelijke emissieberekeningen kennen soms grote onzekerheden. Bijvoorbeeld, de uitstoot van een auto op de weg kan in werkelijkheid anders zijn dan de gerapporteerde uitstoot (met dieselgate als voorbeeld), bronnen kunnen simpelweg niet bekend zijn, of verkeerd gerapporteerd zijn. Ook kunnen er verschillen optreden tussen landen en van jaar tot jaar door verschillen in rapportage en gebruikte methodieken.

De modellen.

Er zijn meerdere modellen beschikbaar voor het berekenen van de verdeling van stikstofverbindingen in Nederland per locatie, de verdeling in de hoogte, het verloop in de tijd, etc.. Het RIVM maakt gebruik van het OPS (Operationele Prioritaire

Stoffen model) voor rapportages van de concentraties en depositie van stikstof, en voor de vergunningverlening als onderdeel van het AERIUS systeem (<https://www.aeriusproducten.nl>). Ook maakt het RIVM gebruik van een regionale implementatie van het EMEP-model (<https://emep.int/mscw/>). Een ander veel gebruikt model in Nederland is LOTOS-EUROS (<https://airqualitymodeling.tno.nl/lotos-euros/>), ontwikkeld door TNO. Het gebruik van meerdere modellen is nuttig om een deel van de modelonzekerheid in kaart te brengen. Vaak is de gecombineerde modeluitkomst nauwkeuriger dan de uitkomst van een enkel model.

De concentraties reactief stikstof variëren sterk van dag tot dag als gevolg van het weer, en de modellen maken daarom gebruik van weersgegevens. Deze modellen gebruiken de gerapporteerde emissies, en beschrijven de chemische reacties, het transport in de lucht en de depositie naar de grond.

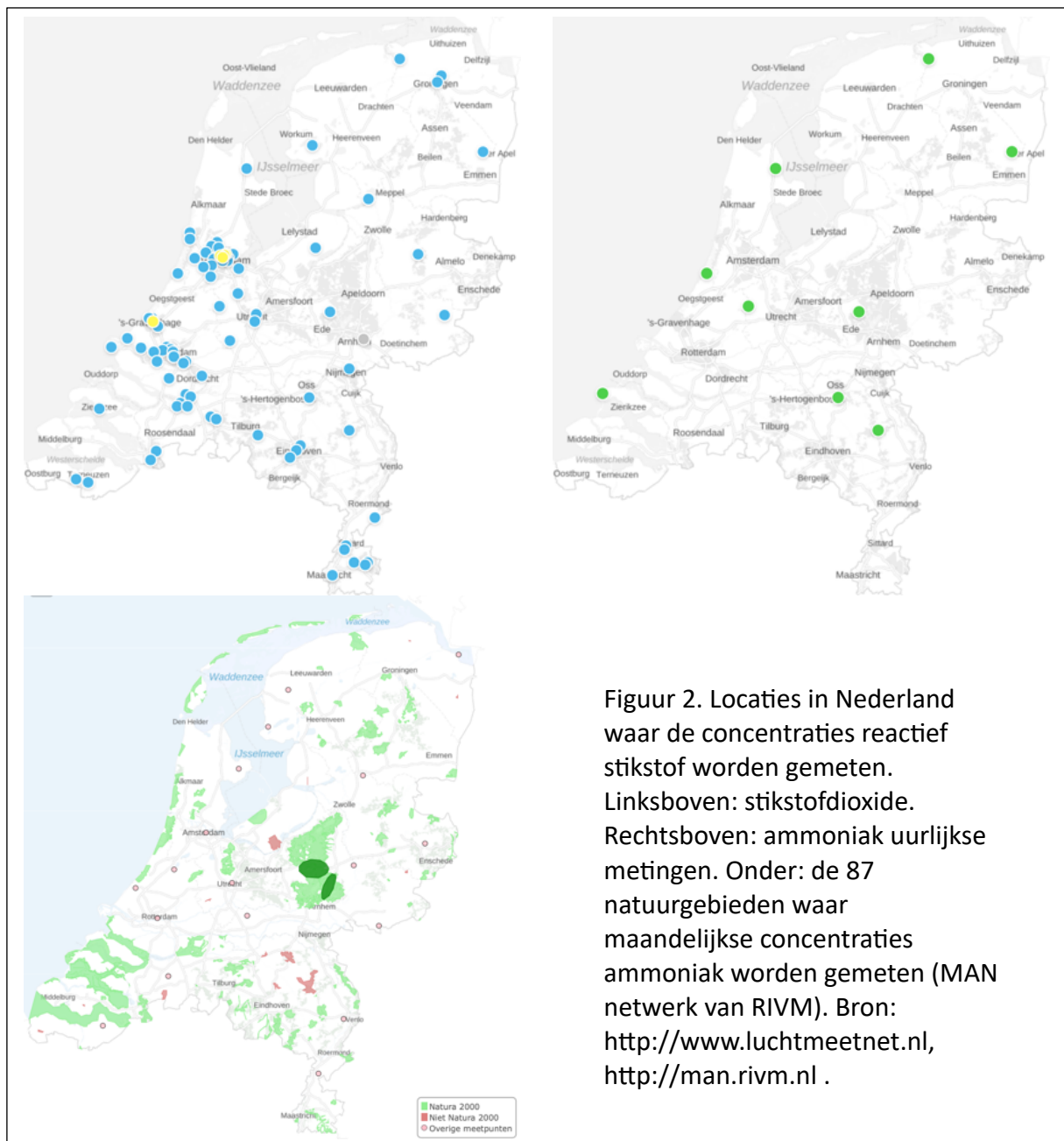
Naast deze grootschalige modellen worden ook verspreidingsmodellen gebruikt voor het beschrijven van de pluimen van vervuiling op korte afstanden van de bron (tientallen meters tot tientallen kilometers) en voor het bestuderen van turbulentie in de lucht en de gevolgen hiervan op het transport, depositie en chemische omzetting van stikstof in lucht. Modellen zijn daarnaast ook nodig om toekomstverwachtingen te maken en emissiereductie scenario's door te rekenen.

Universiteiten en kennisinstituten in binnen- en buitenland, zijn voortdurend bezig om deze modellen te verbeteren en te toetsen met metingen. Doel is om de onzekerheden voortdurend kleiner te maken en er zo voor te zorgen dat het stikstofbeleid wetenschappelijk robuust onderbouwd blijft.

De metingen.

Zonder metingen vormen de uitkomsten van de emissieberekeningen en van de modelberekeningen van de concentraties en depositie een "papierwerkelijkheid". Het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit (LML) en het Meetnet Ammoniak in Natuurgebieden (MAN) van het RIVM verricht het merendeel van de operationele stikstof metingen in Nederland. De meetlocaties zijn aangegeven in Figuur 2. Daarnaast wordt ook de droge depositie gemeten in zes natuurgebieden.

Het grote aantal MAN meetpunten in Nederland is uniek in vergelijking met andere landen, en geeft een goed beeld van de concentraties verdeeld in natuurgebieden over het land. Toch zijn alleen metingen niet genoeg. NO_2 en NH_3 concentraties variëren sterk van locatie tot locatie. Zo is de concentratie vlak bij de bron (een veebedrijf, of een drukke weg) een stuk hoger dan een kilometer verderop. Er zijn grote gebieden tussen de meetpunten waar geen meetinformatie is, met name buiten de natuurgebieden, zie figuur 2. Daarom worden modellen, zoals OPS van het RIVM, gebruikt om de gaten tussen de meetpunten op te vullen. Deze modellen worden vergeleken en gekalibreerd, zodat ze op de meetlocaties de meetwaardes goed benaderen. Met name voor depositie is het aantal meetpunten beperkt, terwijl de onzekerheden in het modelleren van de emissie en de depositie relatief groot zijn.



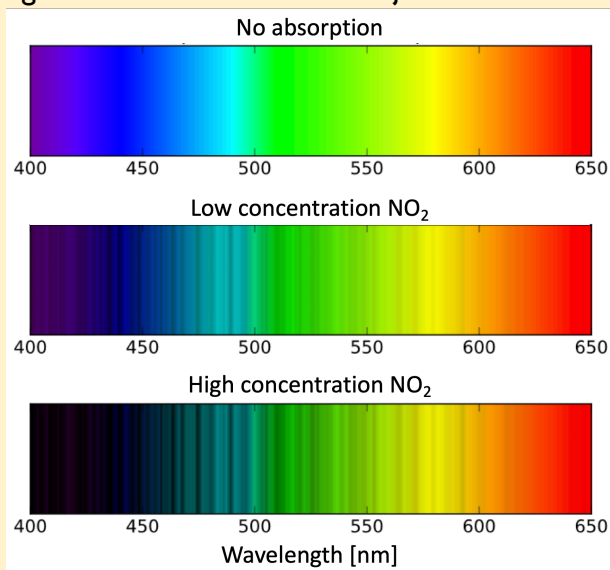
Ook metingen hebben onzekerheden. Deels door het instrument zelf, maar ook door de locatie waar de meting gedaan wordt. Deze locaties worden zorgvuldig gekozen, maar zelfs kleine bronnen heel dicht bij de meetopstelling kunnen ervoor zorgen dat de meting geen goede afspiegeling is van de concentraties in een groter gebied rond de meting.

De meetnetten geven een beeld van de concentraties aan de grond, maar geven hiermee een beperkt beeld van het transport van de vervuiling door de lucht, wat ruwweg plaatsvindt in de onderste kilometer van de atmosfeer (de zogenoemde grenslaag). Kennis over de concentraties in deze onderste kilometer van de atmosfeer is belangrijk om te toetsen of de modellen dit transport goed beschrijven, en om bijvoorbeeld in te schatten welk deel van het stikstof geproduceerd in

Kader 3: Meten van atmosferische componenten vanuit de ruimte



De instrumenten CrIS (Cross-track Infrared Sounder), IASI (Infrared atmospheric sounding interferometer), OMI (Ozone Monitoring Instrument) en TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) vliegen banen rond de aarde over de zuid- en noordpool (polaire baan), 14 tot 15 rondjes per dag, en de aarde draait onder de satelliet door in 1 dag. Omdat de kijkhoek van het instrument groot is, meet TROPOMI in 1 dag de NO_2 verdeling over de hele wereld (zie afbeelding). TROPOMI heeft een vaste tijd van overkomst, 13:30 in de middag. CrIS en IASI hebben eveneens een dagelijkse globale dekking met een vaste overkomsttijd van 13:30 en 9:30.



Satellietinstrumenten meten de intensiteit van het licht dat terugkomt van een stukje oppervlak van de aarde. Deze intensiteit wordt gemeten voor een groot aantal kleuren (golflengtes van het licht) apart. Ons oog neemt drie primaire kleuren waar, instrumenten als IASI en TROPOMI meten er duizenden. Gassen zoals stikstofdioxide en ammoniak absorberen hele specifieke kleuren, terwijl ze andere kleuren doorlaten. Het vergelijken van de intensiteit van het licht voor de verschillende kleuren geeft dan een patroon van lichte en donkere lijnen, en dit patroon is uniek voor voor ieder gas, zoals geïllustreerd voor NO_2 . Het herkennen van dit patroon betekent dat er NO_2 in de atmosfeer aanwezig is. Het patroon fungeert als een soort unieke streepjescode voor dit gas.

Ammoniak kan het beste gemeten worden door te kijken naar de warmtestraling afkomstig van de aarde (infrarood licht) met de instrumenten CrIS of IASI. Stikstofdioxide wordt gemeten in het blauwe deel van het zichtbaar licht door TROPOMI.

Nederland terecht komt in het buitenland, en welk deel in Nederland neerslaat. Dit kan alleen met modellen bepaald worden.

Satellieten brengen nuttige extra informatie over dit transport omdat ze de totale hoeveelheid NH_3 en NO_2 in die grenslaag kunnen meten, en deze hoeveelheden in het hele land in kaart kunnen brengen.

Huidige satellietmetingen

NH_3 en NO_2 worden beide waargenomen vanuit de ruimte door meerdere satellietinstrumenten. Ammoniak is te bepalen met behulp van metingen in het infrarood, stikstofdioxide met metingen in het blauwe deel van het zichtbare spectrum (kader 3).

De belangrijkste instrumenten voor het meten van ammoniak:

- De CrIS infrarood instrumenten op de satellieten van NOAA (VS). Dit instrument geeft ammoniakmetingen met momenteel de beste kwaliteit. In het figuur geven we een voorbeeld van de CrIS metingen. Er zijn nu drie CrIS instrumenten gelanceerd, met nog 2 geplande lanceringen in 2027 en 2032. Met een geplande missieduur van in ieder geval 2013-2035 is de totale dekking meer dan 20 jaar. CrIS meet de totale hoeveelheid NH_3 voor gebieden van ongeveer $15 \times 15 \text{ km}^2$.
- Het IASI instrument op de METOP satellieten van EUMETSAT (Europa). Een voordeel van deze metingen is dat deze operationeel zijn. Een verder voordeel is de lange tijdreeks die beschikbaar is – vanaf 2007 - en verder beschikbaar zal komen. Er zijn drie METOP satellieten na elkaar gelanceerd die een periode van 20 jaar bestrijken. IASI meet de totale hoeveelheid NH_3 voor gebieden van ongeveer $12 \times 12 \text{ km}^2$.

De belangrijkste instrumenten voor het meten van stikstofdioxide:

- Het meest geavanceerde instrument voor NO_2 is momenteel TROPOMI op de EU Copernicus satelliet Sentinel-5P. TROPOMI is in Nederland ontworpen en gebouwd. TROPOMI is gelanceerd in oktober 2017, en een continue stroom van dagelijkse data is beschikbaar sinds mei 2018, een datareeks van 6 jaar. TROPOMI meet de totale hoeveelheid NO_2 voor gebieden van ongeveer 5 km bij 5 km.
- Het Nederlands-Finse OMI instrument op de NASA satelliet EOS-Aura meet NO_2 vanaf eind 2004 tot heden. De lange tijdreeks van OMI van bijna 20 jaar geeft de unieke mogelijkheid om het verloop en de variabiliteit van de concentraties in de afgelopen twee decennia in kaart te brengen. OMI meet gebieden van ongeveer 20 km bij 20 km en het is daarom lastiger om individuele bronnen van uitstoot te identificeren.

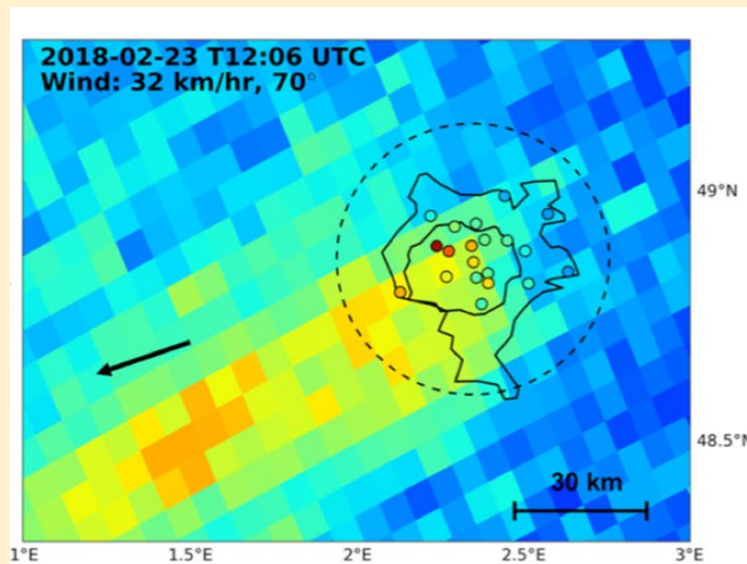
Bijdrage van satellietmetingen

Satellietmetingen kunnen op meerdere manieren bijdragen aan onze wetenschappelijke kennis rond emissies, verspreiding en depositie, en de toetsing van de huidige modellen. Hiermee leveren satellieten relevante informatie voor beleid:

Emissiekaarten op basis van satellietmetingen

Wellicht de grootste toegevoegde waarde van satellieten is de informatie die metingen geven over de uitstoot (emissie). Die uitstoot kan geschat worden door de metingen van de totale hoeveelheid NH_3 of NO_2 te combineren met informatie van

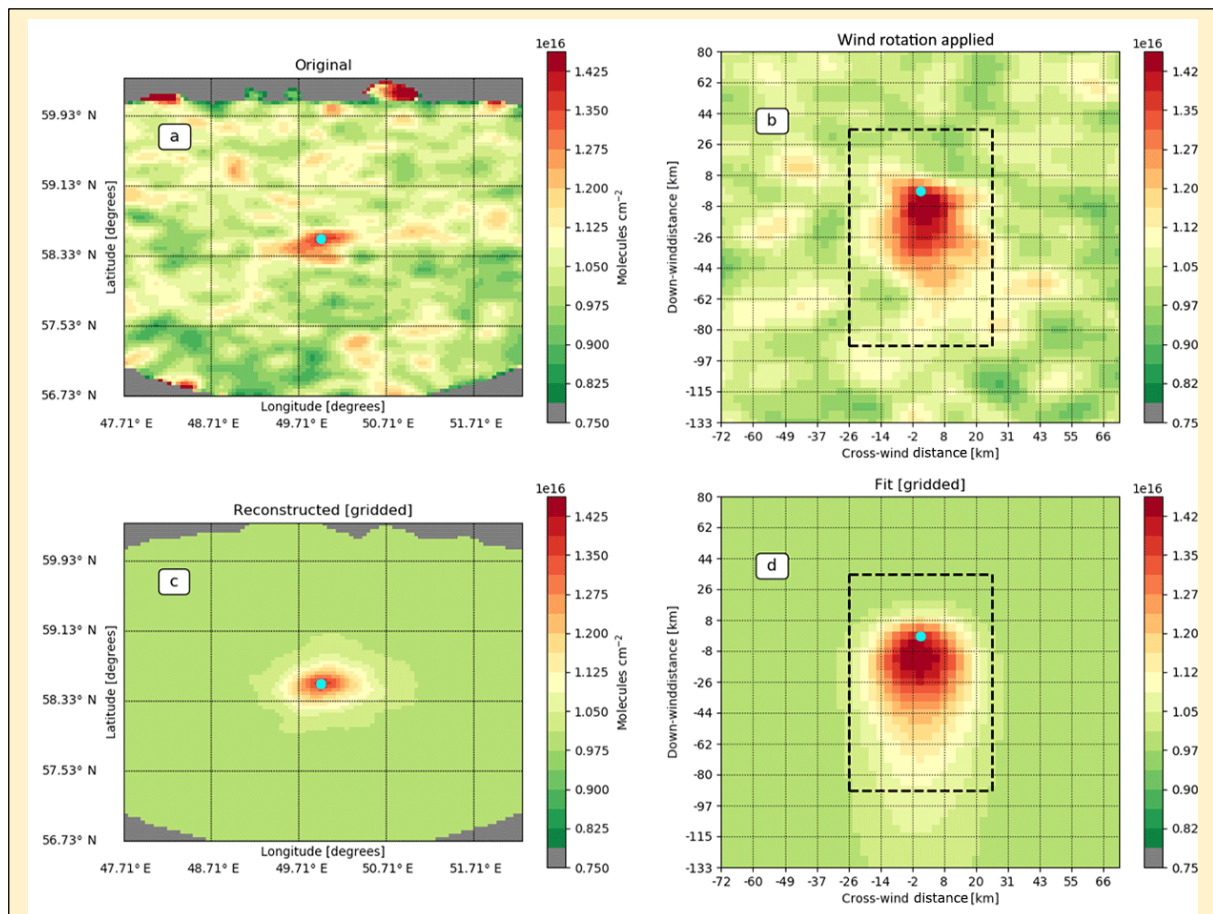
Kader 4: Het meten van emissies met satellieten



Satellietinstrumenten meten de totale hoeveelheid NH_3 of NO_2 in de atmosfeer. Dit is direct te vertalen in een schatting van de emissiesterkte omdat we ook de windsterkte kennen uit de dagelijkse weersverwachting. Het principe wordt geïllustreerd in de figuur, die de NO_2 hoeveelheden (ieder blokje is 1 meting) laten zien die gemeten zijn door TROPOMI boven Frankrijk op 23 februari 2018 rond het middaguur. Geel-oranje geeft verhoogde concentraties aan, blauw de achtergrondconcentraties.

Wat we zien is de NO_2 die vrijkomt in de stad Parijs (binnen de cirkel zijn de contouren van de stad weergegeven, samen met metingen van concentraties dicht bij de grond in de stad) en meegevoerd wordt door de wind uit het noordoosten. De zwarte pijl geeft de windrichting en windsnelheid weer. Door de gemeten verhoging van de totale hoeveelheid NO_2 in de pluim van Parijs te combineren (vermenigvuldigen) met de snelheid waarmee de vervuiling wegstroomt (de windsterkte) hebben we een direct schatting van de uitstoot: wat wegstroomt is bij benadering gelijk aan wat er in Parijs in de lucht komt.

Bron: Lorente en co-auteurs, *Nature Sci Rep* 2019, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56428-5>



Een vergelijkbaar principe is toepasbaar op metingen van ammoniak. Door de grovere resolutie van de metingen is alleen een langere periode van metingen nodig om wat te kunnen zeggen over de emissies van individuele bronnen. De bovenstaande figuur geeft een voorbeeld weer van de gemiddelde ammoniakconcentratie (2013-2017) rondom een kunstmestfabriek in Rusland (a). Door middel van een combinatie van de windrichting, snelheid en concentratie gemeten door de satelliet, kunnen alle satellietmetingen gedraaid worden alsof de wind altijd uit het noorden komt (b). Dit proces zorgt ervoor dat de pluim van een individuele bron in kaart kan worden gebracht. Op basis van deze gedraaide metingen kan vervolgens de emissie worden afgeleid (d), welke vergeleken kan worden met de gerapporteerde emissies.

Bron: Dammers en co-auteurs, ACP 2019, <https://doi.org/10.5194/acp-19-12261-2019>

de wind, zie kader 4. Ook kunnen we de satellietmetingen direct combineren met modellen, en in de modellen de emissies aanpassen totdat de gemodelleerde hoeveelheid overeenkomt met de meting. Het resultaat is een aangepaste emissiekaart op basis van satellietmetingen. Voor grote bronnen kunnen we de uitstoot apart bepalen. Voor kleinere bronnen krijgen we een schatting van de som van de emissies binnen een gebied ter grootte van een enkele satellietmeting, e.g. ongeveer 5 bij 5 km voor TROPOMI en 12-15 km in diameter voor NH₃.

Deze methode kan aanzienlijke voordelen opleveren. De satellietmetingen geven een grotendeels onafhankelijke schatting van de uitstoot (zie kader 4) inclusief de ruimtelijke verdeling en tijdsafhankelijkheid van deze uitstoot. In plaats van emissies

gebaseerd op berekeningen en rapportages hoeveel een bepaalde activiteit aan uitstoot genereert, hebben we nu een emissieschatting op basis van metingen. Registreren en berekenen is daarmee vervangen door observeren. Bronnen die niet in de registratie zitten worden wel door de satelliet waargenomen (mits het signaal sterk genoeg is). Veranderende emissies door nieuwe activiteiten, of het stoppen van een industriële activiteit worden waargenomen door de satelliet. In kader 5 vergelijken we de emissieschatting uit satellietmetingen met emissies zoals gerapporteerd door de Emissieregistratie.

Het vergelijken van gerapporteerde emissies en de emissies afgeleid uit satellietwaarnemingen levert belangrijke informatie over de onzekerheid in de gerapporteerde emissies, die anders moeilijk te kwantificeren is. Individuele bronnen die sterk afwijken kunnen apart bestudeerd worden. Uit de locatie van de emissie, bepaald uit de satellietmetingen, kunnen we indirect informatie halen over de bron categorieën, zoals industrie, wegverkeer, landbouw, scheepvaart of zelfs emissies uit de bodem. Merk op dat we te maken hebben met puntbronnen (bijvoorbeeld industrie, energiecentrales en landbouw/stallen), lijnbronnen (verkeerswegen, scheepvaartroutes) en vlakbronnen (vnl. landbouw/bodememissies maar ook de uitstoot in een stad door verkeer en verwarmen van huizen).

Noodzakelijk is hierbij om in kaart te brengen hoe groot de onzekerheden zijn in de satellietmetingen en in de technieken om de emissie te bepalen aan de hand van deze metingen. Hier is verder onderzoek voor nodig, en dit wordt deels gedaan in het NKS programma (kader 2).

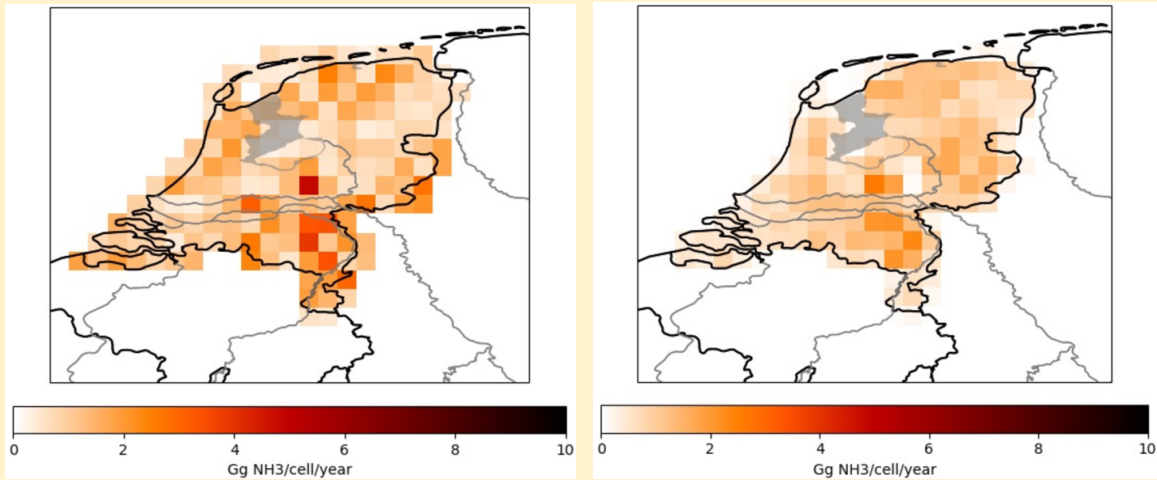
Het toetsen van concentraties berekend met modellen

Behalve concentraties aan de grond is het voor het transport van stikstof (van de bron naar de plek waar de stikstof neerslaat, bijvoorbeeld een natuurgebied, of in het buitenland) van belang om te weten hoeveel NO_2 en ammoniak er zich in hogere luchtlagen bevindt. De satelliet geeft hier informatie over omdat het de totale hoeveelheid gas meet die in een kolom in de atmosfeer aanwezig is.

Modellen zoals LOTOS-EUROS en EMEP kunnen in detail vergeleken worden met de satellietgegevens. De verschillen met de satellietmetingen geven inzicht in vragen zoals: Is de verdeling van emissies en de hoeveelheid consistent met de metingen? Komen de gemodelleerde dagelijkse pluimen overeen met de metingen (zie kader 5)?

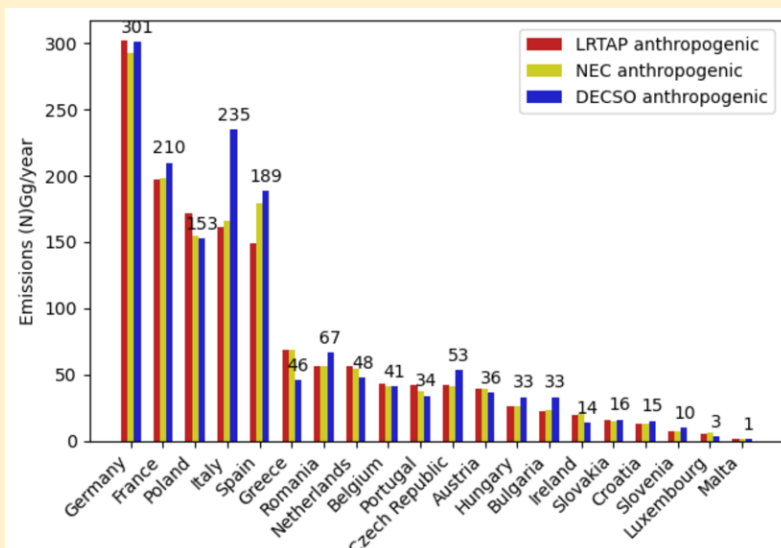
De emissies die gebruikt worden in de modellen kunnen aangepast worden zodanig dat de berekende concentraties overeenkomen met de satellietmeting. Dit is een alternatieve manier om de emissies te schatten. Ook kunnen processen beschreven door het model (zoals het verticale en horizontale transport van stikstof, de chemische reacties in de atmosfeer) aangepast worden om een betere beschrijving te krijgen van de waargenomen vorm van de pluim.

Kader 5: Emissies geschat op basis van satellietmetingen



Vergelijking van NH₃ emissies in 2020 geschat op basis van CrIS satellietmetingen (links) en de Emissieregistratie (rechts) voor gebieden van 0.2 lengtegraad bij 0.2 breedtegraad (ongeveer 13 bij 22 km). Merk op dat de Emissieregistratie emissies op veel hogere resolutie beschikbaar zijn, maar zijn opgeteld voor de vergelijking. Dit zijn eerste voorlopige resultaten verkregen binnen het Nationaal Kennisprogramma Stikstof, en een startpunt voor verdere studie. De hoeveelheid en de verdeling van de uitstoot over Nederland is al goed vergelijkbaar in deze eerste resultaten.

Bron: Ding en coauteurs, 2024, <https://doi.org/10.5194/acp-24-10583-2024>



Vergelijking van de totale NO_x emissies gerapporteerd voor individuele landen in Europa in 2020 (labels LRTAP en NEC, rood en geel) vergeleken met emissies bepaald op basis van TROPOMI NO₂ satellietmetingen (label DECSO, blauw). De resultaten laten een grote mate van consistentie zien tussen de waargenomen en gerapporteerde emissies.

Bron: van der A en coauteurs, 2024, <https://doi.org/10.5194/acp-24-7523-2024>

En hoe zit het met depositie?

De metingen van kolomhoeveelheden met een satelliet zijn niet direct om te zetten naar depositiegetallen. Maar indirect zijn schattingen te maken van de droge depositie door satellietmetingen te vertalen naar grondconcentraties en te combineren met een depositiemodel.

Het analyseren van de pluimen van vervuiling waargenomen door de satelliet levert informatie op over de afstand vanaf de bron waarover de NO_2 of NH_3 getransporteerd wordt. De lengte van de pluimen is een maat voor de snelheid waarmee chemische reacties en depositie plaatsvinden in de atmosfeer.

De potentie van satellietmetingen

Satellietmetingen worden momenteel nog niet ingezet in Nederland voor het monitoren van reactief stikstof. Naast de emissieschattingen en de modevaluatie zoals hierboven beschreven zijn er meerdere redenen waarom het gebruik van satellietdata interessant is:

- Veel satellietinstrumenten zijn operationeel. Dit betekent dat metingen **beschikbaar komen kort nadat de meting gedaan is**, vaak binnen 3 uur, en ook emissieschattingen kort na de meting bepaald kunnen worden. Dit in contrast met bijvoorbeeld de gerapporteerde emissies, die normaal gesproken pas na een paar jaar gepubliceerd worden. Dit biedt de mogelijkheid om concentraties en emissies van dag tot dag te volgen, en wekelijks of maandelijks te rapporteren. (Op dit moment gebeurt dit nog niet voor Nederland.)
- Met de satelliet meetreeks kunnen we de **tijdsafhankelijkheid** in de concentraties (emissies) volgen. Emissies worden als jaargemiddeldes gerapporteerd, maar satellieten geven de mogelijkheid om de seizoen variatie in kaart te brengen, en verschillen door bijvoorbeeld weersinvloeden van jaar tot jaar te documenteren.
- Dit is interessant voor het monitoren van **abrupte veranderingen**, zoals grootschalige calamiteiten, natuurbranden, maatregelen om de industrie schoner te maken, of abrupte maatregelen zoals de COVID-19 lockdowns. Met TROPOMI konden we de grote afnames van NO_2 van dag tot dag documenteren voor de grote steden wereldwijd.
- Voor operationele missies is een lange tijdreeks van metingen **gegarandeerd**. Dit gebeurt bijvoorbeeld door middel van een aantal dezelfde instrumenten die om de 5 jaar gelanceerd worden. Voorbeelden zijn CrIS en IASI, die ammoniak meten, en waarvan er nu meerdere zijn gelanceerd. Het OMI instrument (metingen van NO_2) meet nu bijna 20 jaar, en TROPOMI heeft een meetreeks van 6 jaar.

- Dit levert waardevolle informatie op over veranderingen in concentraties van jaar tot jaar, en voor het documenteren van locatie-afhankelijke **trends in stikstofconcentraties**.

Kader 6: Emissies uit satellietmetingen vergeleken met geregistreerde emissies

	Emissieschatting op basis van satellietdata	Emissieregistratie
Methode	Waarnemingen	Rapportages, activiteit * emissiefactor
Sector informatie	Indirect via de lokatie van de emissie	Emissie per sector
Stoffen	Beperkt tot goed waargenomen stoffen	Honderden stoffen
Ruimtelijke resolutie	Van 5 bij 5 km tot 20 bij 20 km totalen	1 km op nationale schaal
Tijdsresolutie	Maandelijks tot dagelijks, seizoensgang	Jaarlijkse emissies (met modellering seizoenen, dagelijkse gang)
Compleetheid	Alle emissies worden gemeten	Rapportage alleen voor grote bedrijven, incomplete kennis van bronsterktes, missende bronnen
Dagelijkse gang	Eén meting op vaste tijd (13:30 TROPOMI)	Totaal van de hele dag
Beschikbaarheid	Emissieschatting binnen 1 maand mogelijk	Beschikbaar na twee jaar
Trends	Waargenomen trend (tot 20 jaar terug)	Gebaseerd op rapportages
Incidentele emissies	Waargenomen natuurbranden, calamiteiten mits groot genoeg, onbewolkt	Niet

De tabel hierboven vergelijkt de emissieschattingen zoals gedaan door de Emissieregistratie met emissies geschat op basis van satellietmetingen. De sterke aspecten van beide aanpakken zijn in groen aangegeven.

- Satellietmetingen geven een **grotere ruimtelijke dekking** van de concentraties van ammoniak en stikstofoxiden en vullen daarmee de stations van het landelijk meetnet en het MAN meetnet goed aan. Ze geven metingen op plekken waar aan de grond geen metingen zijn.
- Satellietmetingen worden na lancering **zonder verdere kosten beschikbaar** gemaakt. Een voorbeeld hiervan zijn de satellietmetingen van het Copernicus programma van de EU die gratis en zonder beperkingen beschikbaar gemaakt worden. Het ontwikkelen van toepassen van satellietmetingen gericht op Nederland kan daarom tegen relatief geringe kosten gedaan worden.

Satellietmetingen zijn complementair

Satellietmetingen zijn aanvullend op metingen van concentraties aan de grond in combinatie met het gebruik van modellen en geregistreerde emissies (zie kader 6).

Er zijn ook beperkingen aan satellietmetingen:

- Satellieten meten niet de concentratie aan de grond, van belang voor het monitoren van de luchtkwaliteit en het schatten van de depositie.
- Huidige satellieten meten (tot) 1 keer per dag, overdag, en niet bij bewolkt weer. Informatie van de hele dagelijkse gang (dag-nacht) is van belang om de totale impact van stikstofverbindingen op de mens en natuur in kaart te brengen.
- Satellieten hebben tot nu toe een beperkt ruimtelijk oplossend vermogen. De individuele metingen van de verschillende instrumenten zijn voor gebieden van 40x40 km² tot 5x5 km²
- Satellietmetingen geven geen directe informatie over de sectoren, en beperkte informatie individuele bronnen (beperkt tot grotere bronnen, gebiedsgemiddeldes).
- Er worden maar een beperkt aantal componenten gemeten vanuit de ruimte met voldoende kwaliteit. De lijst met (toxische) componenten (gassen, fijnstof) waarvoor informatie gewenst is, is duidelijk veel langer.
- De aanloopkosten tot en met de lancering van een satelliet zijn hoog en vergen grote investeringen.

Satellieten meten aspecten die de metingen op de grond niet kunnen leveren, en andersom. Daarom vullen satellietmetingen de metingen aan de grond aan, en vormen ze samen een meer complete bron van informatie om de modellen te toetsen en onzekerheden in kaart te brengen.

De huidige EU-regelgeving vereist uurlijkse metingen van concentraties aan de grond, en stelt specifieke eisen aan de apparatuur, het aantal en de locatie van de meetpunten voor met name het monitoren van de luchtkwaliteit. Satellietmetingen kunnen deze informatie niet leveren, en kunnen het grondnetwerk van lokale meetpunten niet vervangen. Wel wordt er nagedacht over het gebruik van de combinatie van grondmetingen, satellietmetingen en modellen voor toekomstige Europese regelgeving.

Toekomstige satellietmetingen

De ontwikkeling van satellietinstrumenten gaat snel, en in de toekomst zullen we reactief stikstof in nog meer detail waarnemen vanuit de ruimte. De ontwikkelingen gaan hierbij in twee richtingen:

1. Het meten vanaf een **geostationaire** baan met **uurlijkse metingen**. In deze baan staat de satelliet boven de evenaar en draait precies 1x per dag rond de aarde. Daarom meet de satelliet altijd hetzelfde gebied op aarde. De instrumenten van de METEOSAT Third Generation satelliet leveren metingen voor Europa. In plaats van 1 meting per dag worden de metingen elk uur gedaan zolang er daglicht is, en dit levert daarmee informatie over de variatie in de uitstoot en concentraties gedurende de dag. Het Infrared Sounder (IRS) instrument levert ammoniakmetingen, en het Sentinel-4 instrument levert uurlijkse NO₂ gegevens.

2. Toekomstige instrumenten zullen informatie leveren met een veel **hoger ruimtelijk oplossend vermogen**, tot 1 km bij 1 km of kleiner. De recent goedgekeurde TANGO missie (in het SCOUT programma van de European Space Agency ESA) gaat in de toekomst metingen doen van NO₂ voor gebieden van 300 bij 300 meter. Hiermee kunnen een veel groter aantal bronnen individueel in kaart gebracht worden dan met het huidige TROPOMI instrument.

Nederland speelt in de wetenschappelijke ontwikkeling, het ontwerp en de bouw van deze nieuwe satellietinstrumenten een prominente rol, zoals beschreven in de lange-termijn ruimtevaartagenda voor Nederland geschreven in opdracht van de minister van Economische Zaken en Klimaat.