



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

SatGCN

Pilotstudie naar het gebruik van
satellietmetingen bij de GCN-kaart van
stikstofdioxide

RIVM Rapport 2018-0178

D.P.J. Swart | H. Eskes | M. Schaap et al.



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

SatGCN

Pilotstudie naar het gebruik van satellietmetingen
bij de GCN-kaart van stikstofdioxide

RIVM Rapport 2018-0178

Colofon

© RIVM 2019

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

DOI 10.21945/RIVM-2018-0178

D.P.J. Swart (auteur), RIVM
F.J. Sauter (auteur), RIVM
G.J. Velders (auteur), RIVM
H. Eskes (auteur), KNMI
J. Douros (auteur), KNMI
M. Schaap (auteur), TNO
R. Kranenburg (auteur), TNO

Contact:

D.P.J. Swart
Centrum voor Milieukwaliteit
daan.swart@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

SatGCN

Pilotstudie naar het gebruik van satellietmetingen bij de GCN-kaart van stikstofdioxide

Het RIVM maakt jaarlijks een set kaarten waarop de gemiddelde luchtkwaliteit in Nederland staat weergegeven, de GCN-kaarten. Deze worden onder meer gebruikt voor de regelgeving van de luchtkwaliteit op nationaal, regionaal en gemeentelijk niveau. De concentraties van stoffen op de kaarten worden gebaseerd op metingen op leefniveau, in combinatie met modelberekeningen.

Voor de kaart met de concentraties stikstofdioxide, een belangrijke component van luchtverontreiniging, is onderzocht of de kaart beter of goedkoper wordt als er satellietmetingen aan worden toegevoegd. Met de satellietgegevens die momenteel beschikbaar zijn, is dat nog niet het geval.

De gebruikte satellietmetingen komen van het instrument OMI. De opvolger van OMI, het in oktober 2017 gelanceerde instrument TROPOMI, is gevoeliger en kan veel meer details zien. Mogelijk kan TROPOMI daardoor wel een geslaagde bijdrage aan de kaart leveren. Pas vanaf de tweede helft van 2019 zullen voldoende metingen van TROPOMI beschikbaar zijn om dit te testen.

De studie is uitgevoerd door het RIVM, KNMI en TNO.

Kernwoorden: GCN-kaart, stikstofdioxide, luchtkwaliteit, satelliet, aardobservatie, OMI, TROPOMI, LML, OPS, LOTOS-EUROS

Synopsis

SatGCN

Pilot study on the use of satellite measurements in the GCN map of nitrogen dioxide in the Netherlands

Annually, RIVM produces a set of maps showing the average air quality in the Netherlands, the GCN maps. These maps are used in regulations and directives on national, regional and municipal level. The concentration levels of pollutants on these maps are based on measurements at ground level, in combination with model calculations.

This study investigates whether the GCN map with the concentrations of nitrogen dioxide, an important component of air pollution, can be made better or cheaper by adding satellite measurements. With the satellite measurements currently available, this turns out not to be the case.

The satellite measurements used in this study come from the instrument OMI. OMI's successor TROPOMI, launched in October 2017, is more sensitive and can see much smaller details. Therefore, TROPOMI may be able to contribute more successfully to the map. This can be tested starting the second half of 2019, when enough measurements of TROPOMI will be available.

This study was performed by RIVM, KNMI and TNO.

Keywords: GCN map, nitrogen dioxide, air quality, satellite, earth observation, OMI, TROPOMI, LML, OPS, LOTOS-EUROS

Inhoudsopgave

1	Samenvatting — 9
2	Doel van het onderzoek — 11
2.1	Algemene vraagstelling — 11
2.2	Concrete vraagstelling — 11
2.3	Toelichting 11
3	GCN-kaarten — 13
4	OMI — 15
5	Aanpak onderzoek — 17
5.1	Traditionele productie met OPS — 17
5.2	Productie met LOTOS-EUROS — 18
5.2.1	LOTOS-EUROS, vrij model — 19
5.2.2	LOTOS-EUROS met grondmetingen — 20
5.2.3	LOTOS-EUROS met satellietmetingen — 20
6	Resultaten — 21
6.1	OPS — 21
6.1.1	OPS, zonder kalibratie — 21
6.1.2	OPS, met kalibratie — 22
6.2	LOTOS-EUROS — 25
6.2.1	LOTOS-EUROS vrij model en LOTOS-EUROS met grondmetingen — 25
6.2.2	LOTOS-EUROS vrij model en LOTOS-EUROS met satellietmetingen — 26
6.2.3	LOTOS-EUROS, gevoeligheidsstudies — 28
7	Discussie — 31
8	Conclusies — 37
9	Referenties — 39
	Bijlage A. Meetstations, gebruikt in kalibratieproces van NO₂ — 41
	Bijlage B. Statistische analyse van uurlijkse concentraties — 43
	Bijlage C. Regressiecoëfficiënt, verklaarde variantie en RMSE — 45

1 Samenvatting

Een alternatieve aanpak is onderzocht voor de productie van de GCN-kaart voor stikstofdioxide (NO₂). RIVM maakt deze kaart jaarlijks. De kaart wordt gebruikt in de luchtkwaliteit-regelgeving op nationaal, regionaal en gemeentelijk niveau. De alternatieve aanpak maakt gebruik van satellietmetingen, een nieuwe bron van informatie over de luchtkwaliteit in Nederland.

Vraagstelling bij het onderzoek is of de jaarlijkse GCN-kaart beter en/of goedkoper kan worden geproduceerd bij gebruikmaking van satellietmetingen. Dit is onderzocht met metingen van het satellietinstrument OMI. Het onderzoek heeft uitgewezen dat op dit moment de alternatieve aanpak met satellietmetingen niet beter, en ook niet goedkoper is dan de standaardaanpak, waarbij metingen vanaf de grond worden gebruikt.

De standaardaanpak maakt gebruik van het model OPS. Met het OPS-model wordt jaarlijks een kaart van Nederland berekend met de jaargemiddelde stikstofdioxide-concentratie. Deze kaart heeft een resolutie van één bij één kilometer. De kwaliteit van de standaardaanpak blijkt heel hoog. Bij vergelijking met de concentraties op Nederlandse meetstations wordt voor het jaargemiddelde een verklaarde variantie R^2 gevonden van 0.98, een regressiecoëfficiënt van 1.00 en een gemiddelde kwadratische fout (RMSE) gelijk aan 0.94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Bij de alternatieve aanpak is gebruikgemaakt van het LOTOS-EUROS-model op $7 \times 7 \text{ km}^2$, waarbij stikstofdioxide-metingen van grondstations en van het OMI-satellietinstrument worden geassimileerd. Met het OPS-model is zo'n assimilatie niet echt mogelijk. LOTOS-EUROS met assimilatie van grondstations geeft een verklaarde variantie van 0.89, een regressiecoëfficiënt van 0.98 en RMSE van 2.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ook dit zijn goede resultaten, maar minder goed dan de standaardaanpak. We merken hierbij op dat LOTOS-EUROS niet is geoptimaliseerd voor de GCN-toepassing.

Bij de assimilatie blijkt met name de rol van de grondstations belangrijk. Assimilatie van OMI-data verbetert de resultaten slechts in beperkte mate. Op de redenen hiervoor wordt in de discussie nader ingegaan.

Verwacht mag worden dat het recent gelanceerde TROPOMI-satellietinstrument een veel betere kans maakt om succesvol bij te dragen aan de productie van deze kaart. Dit vanwege de veel hogere ruimtelijke resolutie ($3.5 \times 7 \text{ km}^2$ in plaats van $24 \times 13 \text{ km}^2$ bij OMI), minder uitval door bewolking en de hogere kwaliteit van de NO₂-meting. TROPOMI levert ook informatie voor gebieden binnen Nederland en omliggende landen waar geen grondstations beschikbaar zijn. Of een significante bijdrage aan de GCN-kaarten mogelijk is, kan vanaf medio 2019 worden onderzocht, wanneer er een volledig jaar aan metingen van TROPOMI beschikbaar zal zijn.

In dit onderzoek werd naar één aspect van de luchtkwaliteit in Nederland gekeken, de GCN-kaart van stikstofdioxide. Het resultaat van

dit onderzoek impliceert beslist niet dat satellietinstrumenten geen nuttige bijdrage kunnen leveren aan monitoring en onderzoek op het gebied van luchtkwaliteit.

2 Doel van het onderzoek

2.1 Algemene vraagstelling

Kunnen bestaande RIVM-kernproducten op het gebied van Luchtkwaliteit beter en/of goedkoper worden gemaakt wanneer gebruikgemaakt wordt van (beschikbare) satellietmetingen van de luchtkwaliteit?

2.2 Concrete vraagstelling

RIVM produceert jaarlijks een GCN-kaart (*Grootschalige Concentraties Nederland*) voor NO₂, die mede de basis vormt voor nationaal, regionaal en gemeentelijk beleid en regelingen. De concrete vraag die deze studie probeert te beantwoorden is:

kan de GCN-kaart beter en/of efficiënter gemaakt worden wanneer gebruik wordt gemaakt van satellietmetingen van NO₂? Het gaat hierbij om jaargemiddelde concentraties van NO₂ op leefniveau, in Nederland.

Bij deze pilotstudie wordt de vraagstelling bewust geconcretiseerd en ingeperkt. De verworven inzichten en het modelinstrumentarium die ontstaan zijn echter breder toepasbaar. Een positief antwoord voor de GCN-kaart impliceert een bredere toepasbaarheid van satellietdata, ook voor andere RIVM-toepassingen. Anderzijds betekent een negatief antwoord voor de GCN-kaart niet, dat er geen andere toepassingen zijn waarbij satellietmetingen alsnog een positieve bijdrage kunnen leveren.

2.3 Toelichting

Satelliet-teledetectie wordt momenteel beschouwd als een veelbelovende techniek om op metingen gebaseerde verdelingen van NO₂ op de schaal van stad tot mondiaal te bieden. Bovendien kunnen NO₂-troposferische kolommen van instrumenten zoals OMI worden gebruikt voor data-assimilatie (combineren van modelresultaten met metingen) in chemie-transportmodellen. Om de impact en het potentiële voordeel van het gebruik van OMI NO₂-gegevens in de assimilatie in het LOTOS-EUROS-model (Manders et al., 2017), voor een domein inclusief Nederland, te beoordelen, is een aantal verkennende simulaties uitgevoerd met behulp van de Ensemble Kalman Filter (EnKF)-assimilatietechniek.

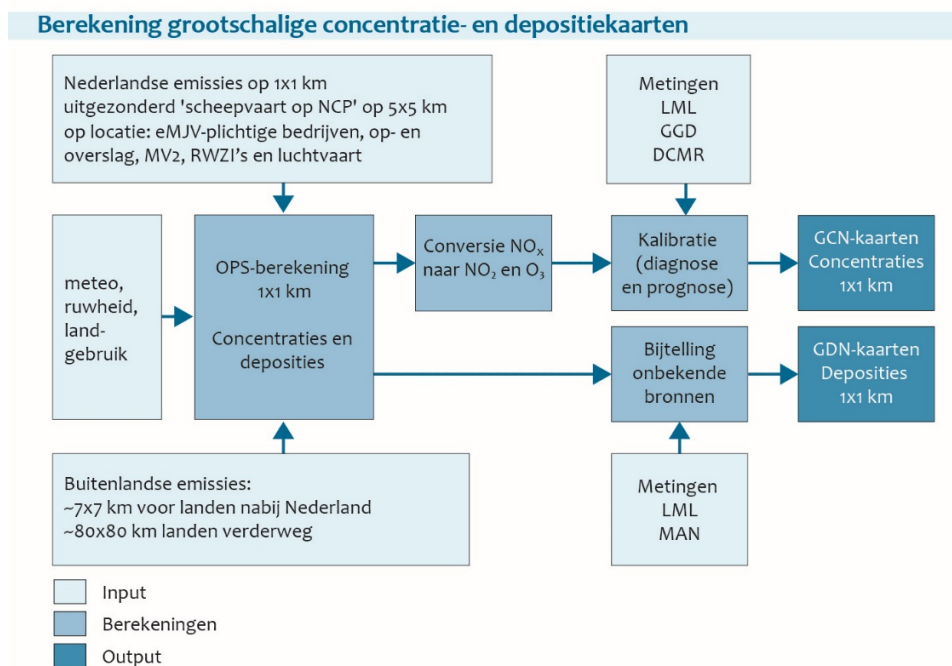
3 GCN-kaarten

Het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) levert jaarlijks kaarten met grootschalige concentraties voor Nederland (GCN-kaarten genoemd) van de luchtverontreinigende stoffen waarvoor Europese luchtkwaliteitsnormen bestaan. Deze kaarten geven een grootschalig beeld (op een schaal van 1 x 1 km²) van de luchtkwaliteit in Nederland, zowel van het verleden als voor de toekomst. Ze worden gebruikt bij de rapportage in het kader van de EU-luchtkwaliteitsrichtlijn, de uitvoering van het Nationaal Samenwerkingsprogramma Luchtkwaliteit (NSL), het definiëren van lokaal beleid en bij planvorming. Het RIVM levert ook kaarten met de grootschalige depositie voor Nederland (GDN-kaarten genoemd) van stikstof en potentieel zuur. De emissiebestanden en scenario's van de GDN-kaarten dienen als basis voor het Programma Aanpak Stikstof (PAS).

De GCN- en GDN-kaarten zijn gebaseerd op een combinatie van metingen en modelberekeningen. De met modellen berekende concentraties worden gekalibreerd op meetresultaten.

De GCN- en GDN-kaarten kunnen gebruikt worden als basis voor gedetailleerde berekeningen van de bijdrage van lokale bronnen aan de grootschalige concentratie of depositie of van toekomstige veranderingen in lokale bronnen. Hiervoor worden modellen gebruikt die specifiek zijn ingericht voor concentratieberekeningen in de buurt van landbouwstallen of drukke wegen. Deze stap maakt geen deel uit van de GCN- en GDN-berekeningen.

Voor meer informatie over GCN wordt verwezen naar de website www.rivm.nl/gcn.



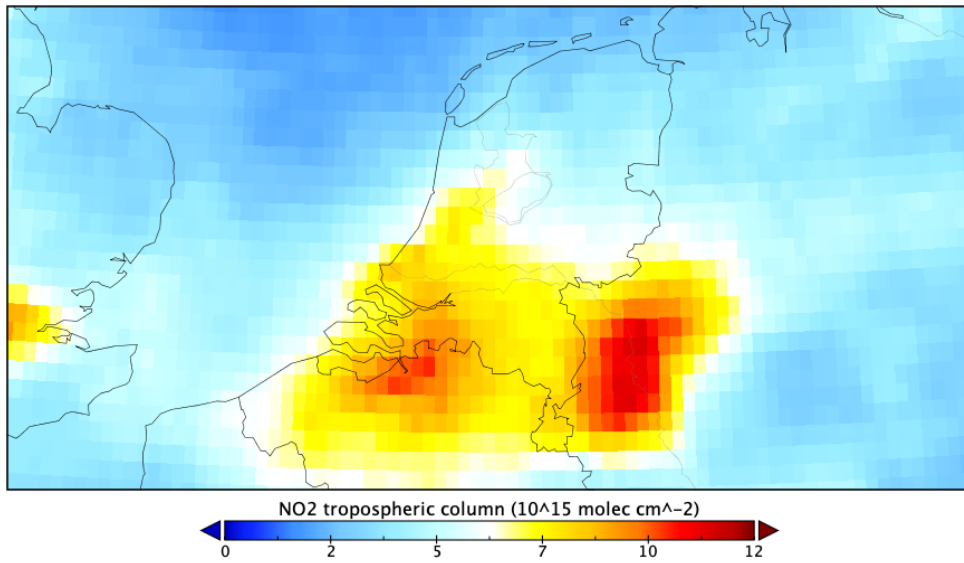
Figuur 1. Berekening grootschalige concentratie- en depositiekaarten.

4 OMI

Het OMI-instrument (<http://projects.knmi.nl/omi>; Levelt et al., 2018) is een spectrometer die de terugstralende zonnestraling meet door de atmosfeer en het oppervlak van de aarde over het golflengtebereik van 270 tot 500 nm met een spectrale resolutie van ongeveer 0,5 nm. De kijkhoek van 114 ° van de telescoop komt overeen met een 2600 km brede bedekking op het oppervlak, waardoor metingen met een dagelijkse wereldwijde dekking mogelijk zijn. Het licht dat de telescoop binnenkomt, wordt gedepolariseerd met behulp van een scrambler en vervolgens opgesplitst in twee kanalen: het UV-kanaal (golflengtegebied 270 - 380 nm) en het VIS-kanaal (golflengtegebied 350 - 500 nm). OMI is gebouwd door Dutch Space en TNO Science & Industry (voorheen TNO-TPD) in Nederland, in samenwerking met Finse onderaannemers VTT en Patria Finavitec. Het instrument is gefinancierd door het Nederlands Agentschap voor Lucht- en Ruimtevaartprogramma's (NIVR) en het Finse Meteorologisch Instituut (FMI).

In de normale modus is de OMI-pixelgrootte 13 km x 24 km als het recht naar beneden kijkt (nadir). Dankzij de relatief kleine pixelgrootte (ten opzichte van vergelijkbare instrumenten zoals SCIAMACHY en GOME-2) kan OMI deels tussen de wolken door kijken, wat belangrijk is voor het afleiden van de NO₂-kolom in de lagere troposfeer (grenslaag). Vanaf ongeveer 2007-2009 is een deel van de OMI-metingen onbruikbaar geworden door de zogenoemde '*row anomaly*'. Meer informatie is te vinden op de OMI-website. Het gevolg hiervan is dat de bedekking van OMI met bijna de helft is gereduceerd (van dagelijkse metingen tot één meting per twee dagen). OMI is in 2004 gelanceerd en heeft meer dan dertien jaar mondiale metingen geproduceerd tot op vandaag. Het instrument is in goede staat en zal hopelijk nog een aantal jaren metingen blijven doen.

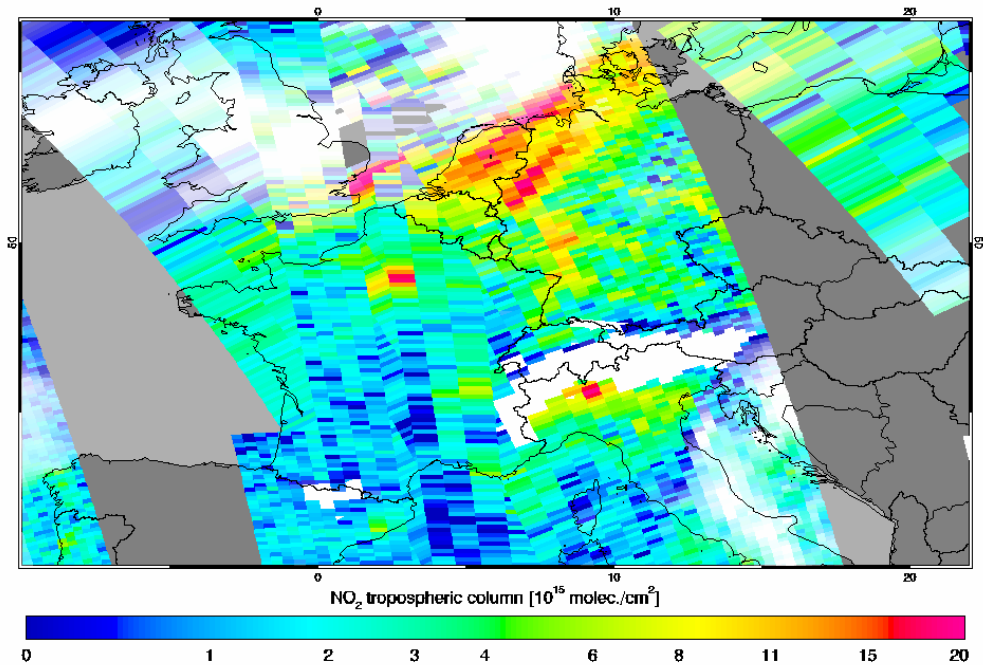
In 2017 is een nieuwe sterk verbeterde OMI-NO₂-dataset beschikbaar gekomen als product van het Europese QA4ECV-project (voor meer details zie Boersma et al., 2018). Merk op dat OMI kolomhoeveelheden meet en er is een model nodig om dit naar concentraties aan de grond te vertalen.



Figuur 2. OMI metingen voor Nederland, gemiddeld over het jaar 2015. Het betreft het QA4ECV NO₂-product (beschikbaar voor de periode 2004-2017) op een grid van 0.125 graad x 0.125 graad (ca. 7 x 14 km²). De grootte van de features geven een indicatie van het ruimtelijk oplossend vermogen van OMI op jaarbasis.

OMI tropospheric NO₂ 17 Apr 2014

QA4ECV



Figuur 3. OMI-metingen voor een enkele onbewolkte dag (17 april 2014; QA4ECV NO₂-product). Te zien zijn de pluimen van het Roergebied, Rotterdam, Antwerpen, Parijs en het transport van vervuiling naar het noordoosten op deze dag.

5 Aanpak onderzoek

Om de vraag te kunnen beantwoorden of de GCN-kaart voor NO₂ beter en/of efficiënter gemaakt kan worden wanneer gebruik wordt gemaakt van satellietmetingen van NO₂, is het noodzakelijk de dagelijkse instantane observaties bij wolkenvrij weer te kunnen interpreteren naar een jaargemiddelde concentratie. Dit is geen eenvoudige taak, aangezien NO₂-concentraties in tijd en ruimte variabel zijn. Een van de mogelijke routes is de metingen te assimileren in een luchtkwaliteitsmodel. Helaas is dit niet mogelijk met het OPS-model, aangezien deze op jaarbasis rekent voor grondconcentraties. Operationele technieken om zowel grond- als satellietwaarnemingen te assimileren zijn wel beschikbaar voor het uur-tot-uur rekenende LOTOS-EUROS-model. Hiermee is ervaring opgedaan op Europese schaal. Deze pilotstudie richt zich dan ook op een haalbaarheidsstudie of de GCN-kaart met vergelijkbare kwaliteit zou kunnen worden gemaakt met behulp van LOTOS-EUROS en satellietgegevens. Expliciet wordt gekeken of de assimilatie van de satellietdata en grondmetingen een positief effect heeft op de kwaliteit van de NO₂-kaart. Er dient aangetekend te worden dat het LOTOS-EUROS-model en de assimilatietechnieken nooit specifiek zijn ontwikkeld of afgestemd voor gebruik voor het ontwikkelen van een GCN-kaart voor Nederland. Dat wil zeggen dat er geen empirische relaties, kalibraties of Nederlands specifieke informatie gebruikt wordt.

Deze haalbaarheidsstudie richt zich dus op het maken van een GCN-kaart voor een jaar met behulp van LOTOS-EUROS, grondmetingen en satellietgegevens en op het vergelijken van deze kaart met een GCN-kaart die op de traditionele manier gemaakt wordt, namelijk met OPS en grondmetingen. Voor het testjaar is gekozen voor 2014, de gemodelleerde stof is NO₂.

We gebruiken dezelfde basisset van emissies (www.emissieregistratie.nl) voor alle modellen en runs; de meteorologische gegevens worden geleverd door ECMWF¹ (<https://www.ecmwf.int/>) voor LOTOS-EUROS en door KNMI-meetstations voor OPS.

De ECMWF-analyse van het weer is mede gebaseerd op de metingen van het KNMI en daarmee grotendeels consistent met de gemeten weersituatie in Nederland.

In verband met beschikbare rekentijd en de OMI-resolutie is gekozen om resultaten van deze pilot te vergelijken op een resolutie van 7 x 7 km², een schaal die het nog mogelijk maakt om stadsachtergrondconcentraties te modelleren.

5.1 Traditionele productie met OPS

De standaardmethodiek om GCN-kaarten te berekenen kan worden onderverdeeld in twee stappen.

¹ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

Stap 1 – Berekening grootschalige concentratie en depositie

Stap 1 betreft de berekening van jaargemiddelde grootschalige concentratie en depositie met het luchtverspreidingsmodel OPS. Hierbij worden bronbijdragen uit heel Europa meegenomen. Als invoer voor het model zijn onder andere gegevens nodig over emissies, zoals sterkte, uitworphoogte en ruimtelijke en temporele verdeling van de bronnen, zowel voor Nederland als voor de andere Europese landen. Het OPS-model berekent NO_x -concentraties waaruit met een empirische relatie, SAPPHO genaamd, NO_2 -concentraties worden berekend (Velders et al., 2014).

Stap 2 – Kalibratie op metingen

De kalibratie van de berekende grootschalige concentraties gebeurt met metingen van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit (LML, 2018; Mooibroek et al., 2014) van het RIVM, aangevuld met metingen van NO_2 , PM_{10} en $\text{PM}_{2,5}$ op achtergrondlocaties in de bebouwde omgeving van Amsterdam, Zaandam, Badhoevedorp en Spaarnwoude door de GGD-Amsterdam en in Rotterdam en Schiedam door de DCMR. Zie bijlage A voor een overzicht van de meetstations die zijn meegenomen bij de kalibratie. Kalibratie wordt uitgevoerd om berekende concentraties (nog) beter in overeenstemming te brengen met gemeten concentraties. Verschillen tussen berekende en gemeten concentraties op regionale en stadsachtergrondstations worden geïnterpoleerd over Nederland en het resultaat wordt bij de met het model berekende waarden opgeteld. De resultaten na kalibratie worden GCN-kaarten genoemd.

OPS

OPS (van Jaarsveld, 2004; Sauter et al., 2016; www.rivm.nl/ops) is een analytisch model dat voor de verspreiding van luchtverontreinigende stoffen gebruikmaakt van een Gaussisch pluimmodel; hierbij volgt de concentratie dwars op de wind een Gaussische verdeling. Voor verspreiding over relatief langere afstanden maakt OPS gebruik van trajectoriën om de baan van een luchtpakket in een veranderend windveld te kunnen volgen. Op deze manier kunnen bijdragen van lokale, regionale en buitenlandse bronnen in één berekening worden gecombineerd. OPS is een statistisch model in de zin dat concentratie- en depositiewaarden worden berekend voor een aantal typische meteorologische situaties en het langetermijngemiddelde wordt berekend door het gewogen gemiddelde te nemen van deze waarden, met de relatieve frequenties van voorkomen als weegfactoren. Zogenoemde achtergrondconcentratiekaarten geven ruimtelijke verschillen en de verandering in de tijd in het algemene concentratieniveau van een aantal verontreinigende stoffen (SO_2 , NO_2 , NH_3) weer. Daardoor is een parametrisatie van chemische omzetting over de afgelopen dertig jaar mogelijk.

5.2 Productie met LOTOS-EUROS

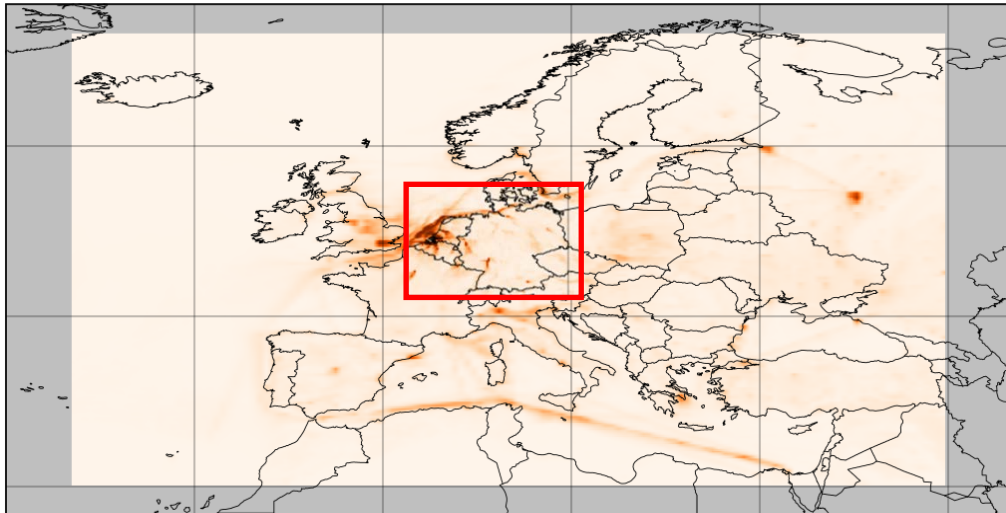
LOTOS-EUROS (Manders et al., 2017) is een Euleriaans chemie-transportmodel (CTM) op regionale schaal met een intermediaire complexiteit die gericht is op de simulatie van luchtvervuiling in de lagere troposfeer. Het gebruik van de Euleriaanse benadering betekent dat de berekeningen voor advectie, verticale menging, chemische

transformaties en verwijderingsprocessen worden uitgevoerd op een driedimensionaal raster.

Simulaties met het LOTOS-EUROS-model zijn gedaan voor het jaar 2014 met behulp van ECMWF-meteorologische gegevens als invoer voor het model. Door middel van een *one-way nesting*-procedure, werd een simulatie over Duitsland, België en Nederland ingebed in een Europees domein. Dit Europese domein wordt gebruikt voor operationele regionale luchtkwaliteitsverwachtingen van de Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) (<http://www.regional.atmosphere.copernicus.eu>). De twee domeinen zijn te zien in **Error! Reference source not found.** en details voor de twee domeinen staan in Tabel 1.

Tabel 1. Informatie over de modelconfiguratie voor beide domeinen.

	EU	Benelux-Germany
modelversie	v2.1	v2.1
resolutie	$\frac{1}{2} \times \frac{1}{4} \text{ }^\circ$ (~28x28 km ²)	$\frac{1}{8} \times \frac{1}{16} \text{ }^\circ$ (~7x7 km ²)
emissies	MACC-III (2011)	OPS-2014 (Nederland), MACC-III (elders)
randvoorwaarde	MACC heranalyse	EU-domein



Figuur 4. Kaart van de twee domeinen gebruikt in deze studie. De rode rechthoek is de grens van het Duitsland-België-Nederland-domein.

5.2.1

LOTOS-EUROS, vrij model

LOTOS-EUROS zonder data-assimilatie ('vrij model') berekent uur-voor-uur concentraties voor verschillende stoffen, waaronder NO₂, op grond van invoergegevens zoals emissies en meteorologische gegevens. Metingen van grondstations of satellieten worden hierbij niet gebruikt. Een run met het vrije model wordt ook wel '*hindcast*' genoemd, omdat er geanalyseerde meteorologische gegevens gebruikt kunnen worden (in tegenstelling tot *forecast*, waarbij alleen verwachtingen van het weer beschikbaar zijn).

5.2.2 *LOTOS-EUROS met grondmetingen*

In de configuratie LOTOS-EUROS + grondmetingen, worden metingen van grondstations gebruikt om het model bij te sturen met behulp van data-assimilatie; LOTOS-EUROS gebruikt de Ensemble Kalman Filter (EnKF)-assimilatietechniek (van Loon et al., 2001; Curier et al., 2012, Curier et al. 2014). Data-assimilatie maakt gebruik van de vrijheid om variaties in onzekere invoerparameters toe te staan en zo modelresultaten en beschikbare metingen optimaal te combineren. Het is belangrijk te begrijpen dat dit geen kalibratie is, maar eerder een gewogen gemiddelde van model en meting, waarbij de onzekerheid in beide de weging bepaalt. De assimilatie stuurt het model uurlijks bij, maar in deze studie kijken we naar het effect op de jaargemiddelde verdeling van NO₂-concentraties.

5.2.3 *LOTOS-EUROS met satellietmetingen*

Om de impact en het potentiële voordeel van het gebruik van OMI NO₂-gegevens in de assimilatie in het LOTOS-EUROS-model voor een domein inclusief Nederland, te beoordelen, hebben we een aantal verkennende simulaties uitgevoerd met behulp van de Ensemble Kalman Filter (EnKF)-assimilatietechniek. De OMI-gegevens die werden gebruikt, zijn het resultaat van het QA4ECV-project (*Quality Assurance for Essential Climate Variables*; Boersma et al., 2018; <http://www.qa4ecv.eu>). Deze dataset is beschikbaar gekomen in 2017, en bevat een groot aantal verbeteringen ten opzichte van het DOMINO-2-product, dat tussen 2011 en 2017 de standaard was.

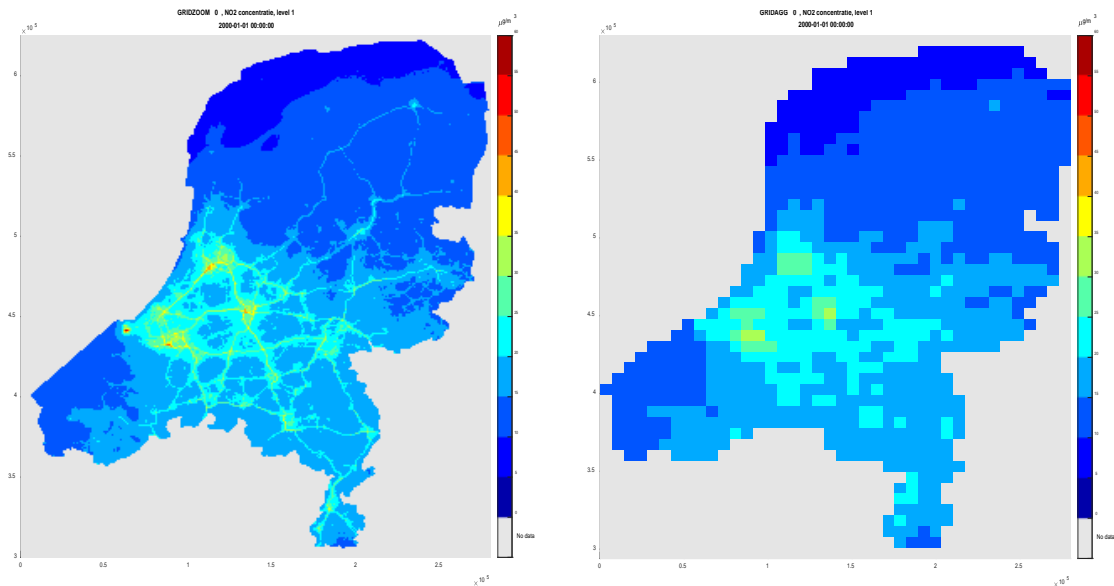
6 Resultaten

6.1 OPS

6.1.1

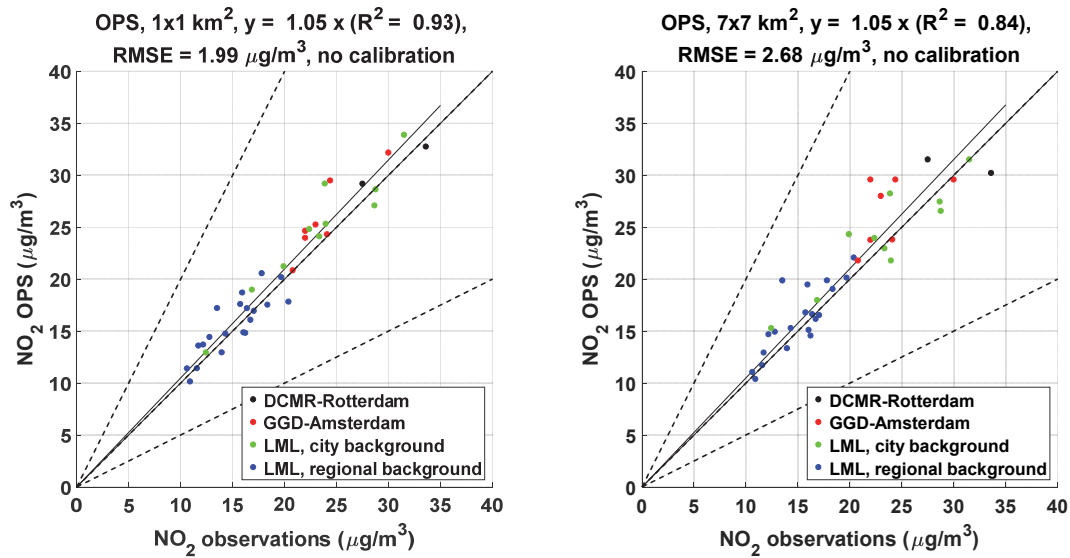
OPS, zonder kalibratie

Het OPS-model (OPS-LT/versie 4.5.2, meteo 2014, emissies 2014, output grid $1 \times 1 \text{ km}^2$) is gebruikt om jaargemiddelde NO_x -concentratiekaarten te maken. Deze NO_x -concentraties worden vervolgens geconverteerd naar NO_2 -concentraties met behulp van SAPPHO (Velders et al., 2014). In het kader van deze studie worden concentraties nog geaggregeerd naar een $7 \times 7 \text{ km}^2$.



Figuur 5. NO_2 -concentratie in 2014, OPS-model. Links: $1 \times 1 \text{ km}^2$ grid, rechts: geaggregeerd naar $7 \times 7 \text{ km}^2$ grid. Bereik kleurenschaal 0-(5)-60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

De volgende *scatterplots* of spreidingsdiagrammen tonen de NO_2 -concentratie van de OPS-gridcel waar een meetstation zich bevindt, vergeleken met de gemeten NO_2 -concentratie. Een lijst met gebruikte stations is te vinden in bijlage A.



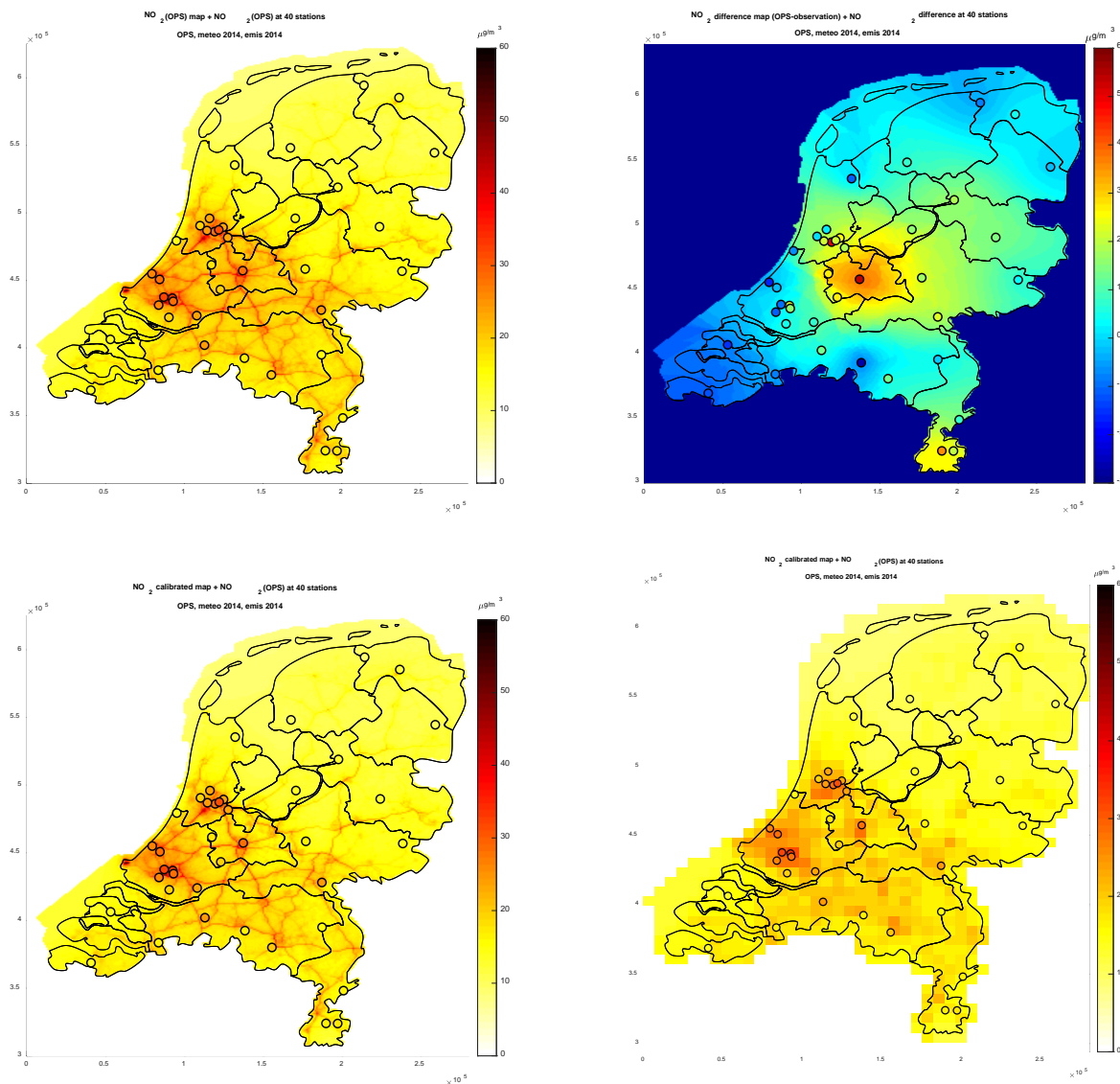
Figuur 6. Scatterplot NO₂-concentraties; ongekalibreerde OPS-concentraties op meetlocaties vs. gemeten concentraties voor regionale en stads-achtergrondstations (zie bijlage A). Geleurd volgens stationstype. Links: 1x1 km², rechts 7x7 km².

De OPS-resultaten zijn zeer goed, de ruimtelijke correlatie met de metingen is hoog. De aggregatie naar 7x7 km² leidt tot grotere verschillen met de metingen.

6.1.2 OPS, met kalibratie

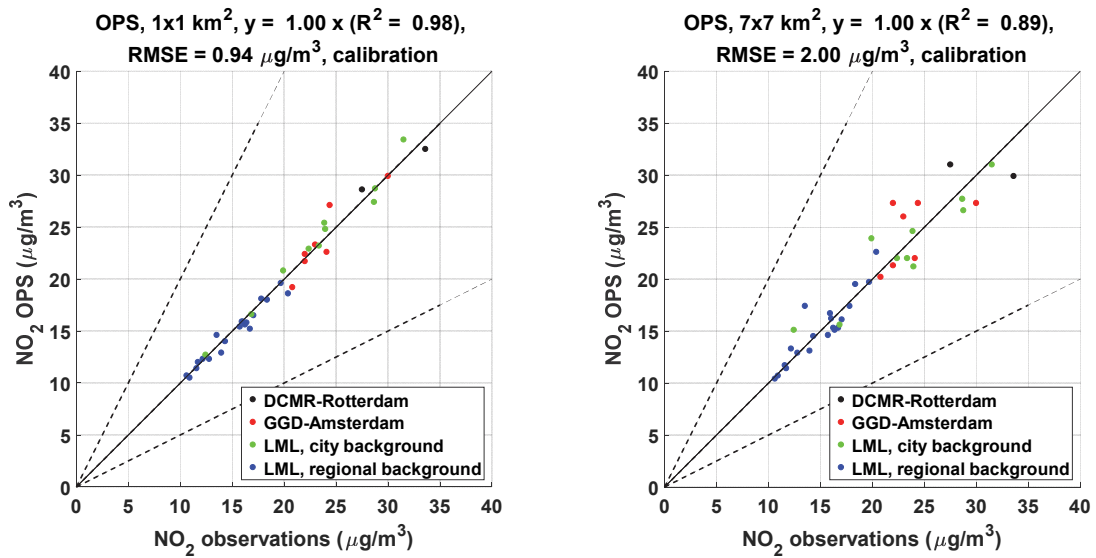
In Figuur 7 tonen we de stappen in het kalibratieproces:

1. haal OPS-gridcelwaarden op locaties van meetstations uit NO₂-kaart;
2. bereken verschillen met waarnemingen op deze locaties en interpoleer deze verschillen naar een kaart van 1 x 1 km²;
3. trek deze kaart van de OPS-kaart af, resulterend in een gekalibreerde kaart van NO₂-concentraties;
4. voor deze studie wordt deze laatste kaart geaggregeerd naar 7x7 km².

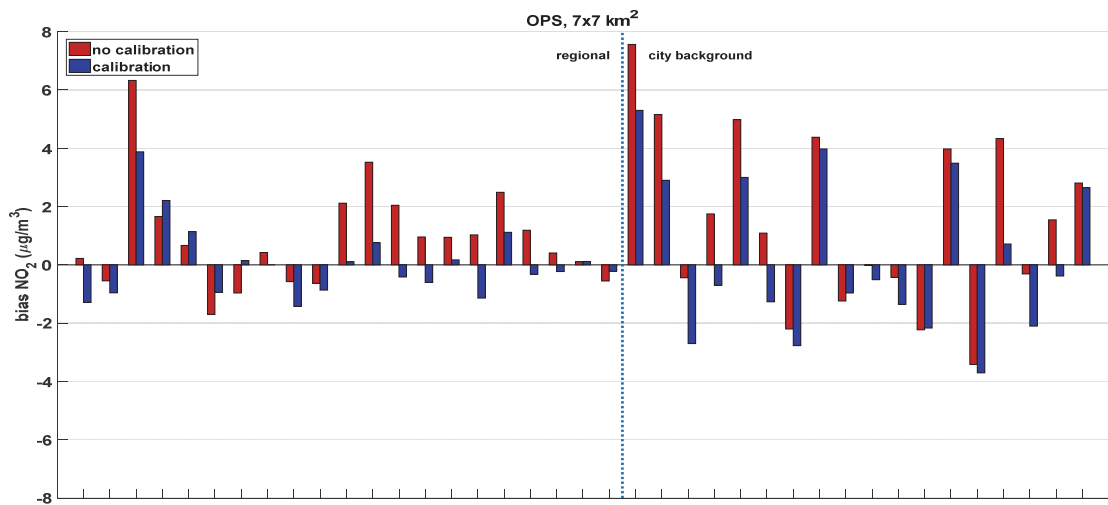


Figuur 7. Kalibratieproces in OPS. OPS-kaarten met NO₂-concentratie in 2014, gecombineerd met gemeten waarden op Nederlandse meetstations (regionaal en stadsachtergrond). Linksboven: OPS gridcel-waarden (niet gekalibreerd), 1x1 km² grid. Rechtsboven: verschil op meetstations + geïnterpoleerde verschilkaart. Linksonder: gekalibreerde NO₂-kaart op 1x1 km²-schaal. Rechtsonder: gekalibreerde NO₂-kaart geaggregeerd naar 7x7 km².

Het effect van kalibratie is te zien in de figuren op de volgende pagina.



Figuur 8. Scatterplot van gekalibreerde OPS-NO₂-concentraties ten opzichte van metingen. Links: 1x1 km², rechts: 7x7 km². Zie bijlage A voor de stations die gebruikt zijn in het kalibratieproces.



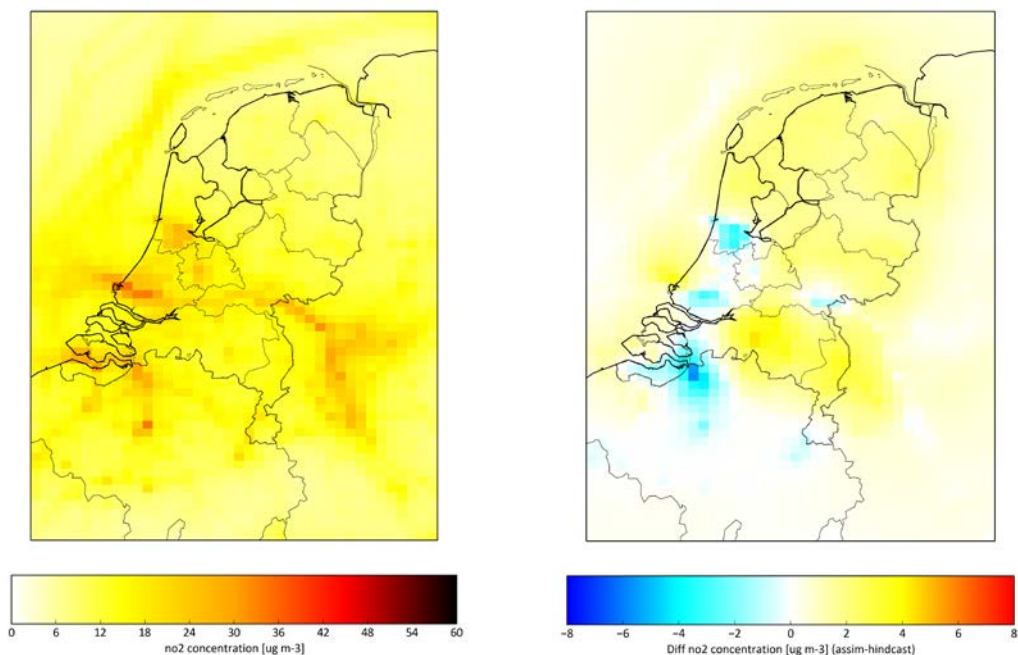
Figuur 9. Afwijking (OPS – meting) in jaargemiddelde NO₂-concentratie (μg/m³) op Nederlandse meetstations voor de run zonder kalibratie (rood) en met kalibratie van grondmetingen (blauw).

6.2 LOTOS-EUROS

6.2.1

LOTOS-EUROS vrij model en LOTOS-EUROS met grondmetingen

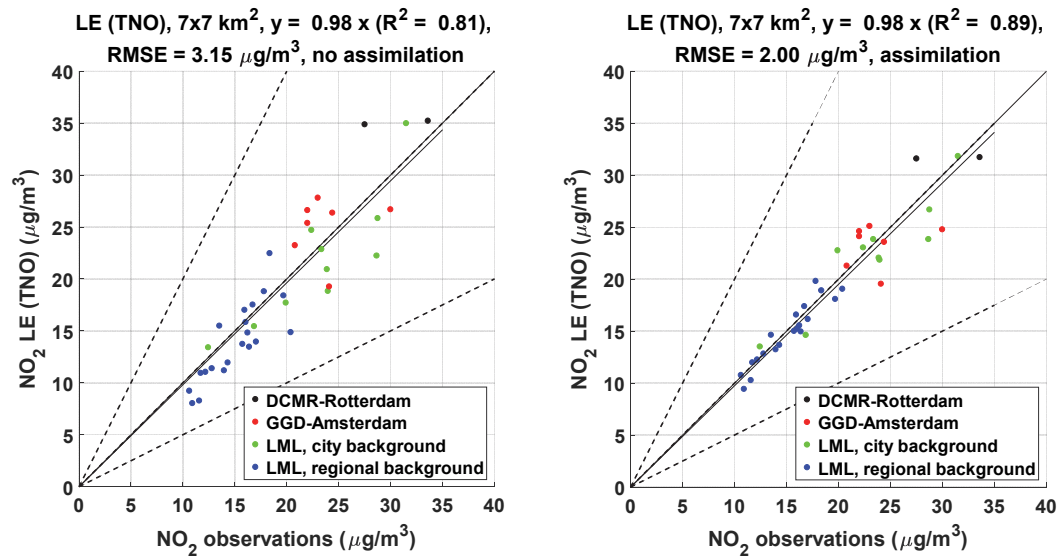
In Figuur 10 (links) wordt de jaargemiddelde NO_2 -kaart voor 2014 gepresenteerd, berekend met LOTOS-EUROS, vrije run. Het effect van data-assimilatie van metingen op grondstations in Nederland is te zien in het rechterdeel van de figuur.



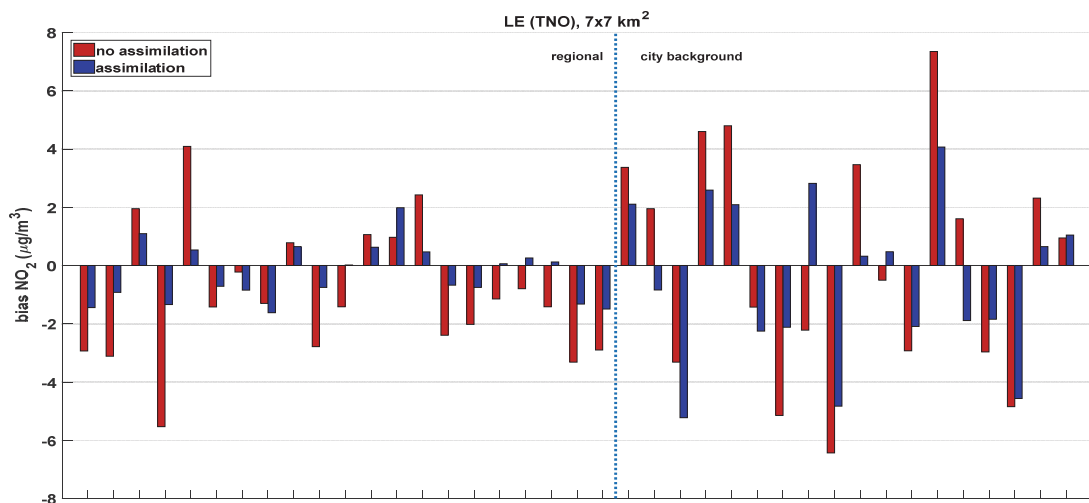
Figuur 10. NO_2 -concentratie voor vrije LOTOS-EUROS-run (links) en rechts het verschil tussen assimilatie met metingen van Nederlandse grondstations en vrije run ('assimilatie'-'vrije run').

Figuur 11 laat de scatterplot van gemodelleerde vs. gemeten NO_2 -concentraties zien: het vrij runnende model heeft een regressiecoëfficiënt die dicht bij 1 ligt en de verklaarde ruimtelijke variantie is 80%. De spreiding rond de 1:1-lijn is wat groter dan bij OPS, maar *overall* is de overeenkomst goed. In gebieden met hoge scheepvaartemissies worden de concentraties overschat, waarschijnlijk omdat LOTOS-EUROS voor deze emissies een te lage effectieve bronhoogte hanteert.

Assimilatie van Nederlandse grondstations zorgt voor het grootste gedeelte van Nederland voor een lichte verhoging van de gemodelleerde NO_2 -concentraties. In stedelijk gebied in Amsterdam, Rotterdam, Arnhem en rond Antwerpen worden de modelberekeningen lager na toepassing van assimilatie. Deze locaties zijn onder meer beïnvloed door scheepvaartemissies. De hoge concentraties van NO_2 door scheepvaart (Rijn/Lek) zijn duidelijk zichtbaar in de jaargemiddelde kaart en worden dus deels naar lagere waarden gecorrigeerd. De ruimtelijke correlatie verbetert duidelijk door de assimilatie: de verklaarde variantie R^2 gaat van 0.81 naar 0.89, de RMSE van 3.15 naar 2.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; de regressielijn blijft hetzelfde.



Figuur 11. Scatterplot van gemodelleerde ($LE = \text{LOTOS-EUROS}$) jaargemiddelde NO_2 -concentraties vs. gemeten concentraties voor de vrije run (links) en de run met assimilatie van Nederlandse grondstations (rechts).



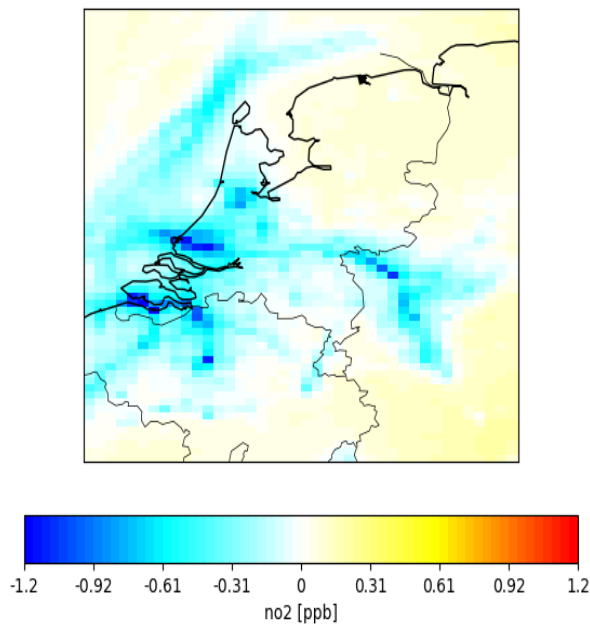
Figuur 12. Afwijking ($\text{LOTOS-EUROS} - \text{meting}$) in jaargemiddelde NO_2 -concentratie ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) op Nederlandse meetstations voor de vrije run (rood) en na assimilatie van grondmetingen (blauw).

Op vrijwel alle stations levert de assimilatie een kleinere gemiddelde afwijking; de sterkste verbetering is op de regionale stations, terwijl voor de urbane stations de verbetering kleiner is.

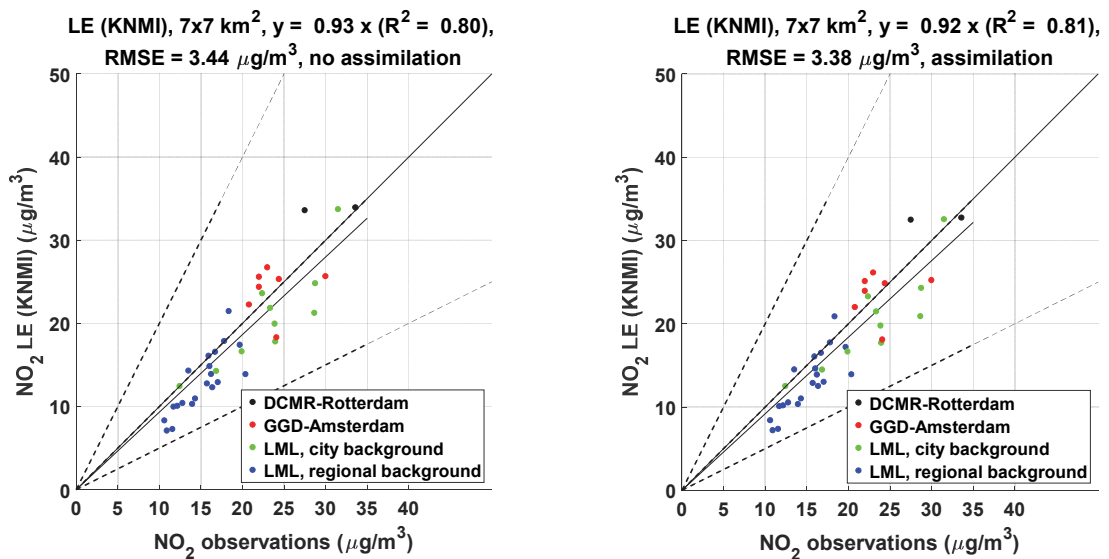
6.2.2

LOTOS-EUROS vrij model en LOTOS-EUROS met satellietmetingen

Om de impact van OMI NO_2 -troposferische kolomassimilatie in LOTOS-EUROS te beoordelen, werd een vrije modelrun (dat wil zeggen geen assimilatie, genaamd '*hindcast*') en een run met OMI NO_2 -assimilatie ('*analyse*') uitgevoerd; zie Figuur 13 en Figuur 14.



Figuur 13. Verschil tussen assimilatie van satellietmetingen en vrije run met LOTOS-EUROS ('assimilatie'-'vrije run'). 1 ppb ~ 2 µg/m³.

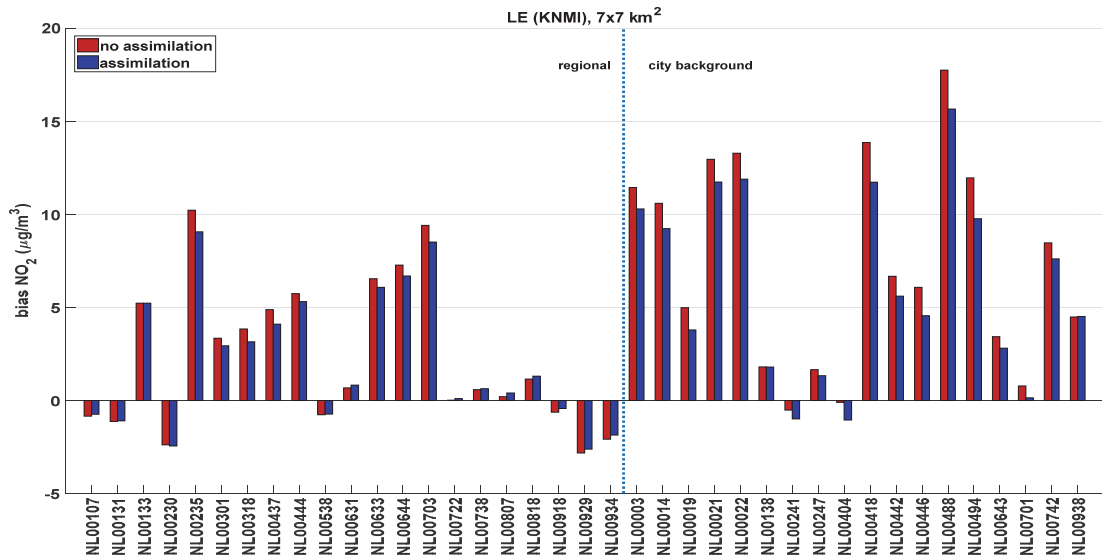


Figuur 14. Scatterplot van gemodelleerde jaargemiddelde NO₂-concentraties op Nederlandse grondstations vs. gemeten concentraties voor de vrije run (links) en de run met assimilatie van satellietmetingen (rechts).

De assimilatie van OMI leidt doorgaans tot lagere NO₂-waarden aan de oppervlakte in Nederland, evenals over zee dicht bij de kust.

De vergelijking met waarnemingen van grondstations wordt op twee manieren uitgevoerd: door middel van spreidingsdiagrammen (zie Figuur 14) en door de berekening van de gemiddelde afwijking (*bias*) voor de Nederlandse stations (zie Figuur 15). Uit deze evaluatie blijkt dat de run met data-assimilatie voor NO₂ beperkt, maar wel meetbaar beter presteert dan de vrije run, waarbij de grootste verbetering van de

bias zich voordoet bij de stations met de grootste overschatting in de vrije run.



Figuur 15. Afwijking (LOTOS-EUROS – meting) in jaargemiddelde NO_2 -concentratie ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) op Nederlandse meetstations voor de vrije LOTOS-EUROS-run (rood) en na assimilatie van satellietmetingen (blauw).

6.2.3 LOTOS-EUROS, gevoeligheidsstudies

Een aantal gevoeligheids simulaties werd uitgevoerd om het belang van verschillende keuzes te beoordelen in de configuratie van het LOTOS-EUROS-model en nabewerking van de resultaten. Deze omvatten de volgende aspecten:

1. Een aanpassing van NO_2 om rekening te houden met andere stikstofcomponenten.
De motivatie is het feit dat NO_2 zoals waargenomen door de meeste meetinstrumenten feitelijk ook andere (NO_y) gassen bevat. Lamsal (2008) heeft gesuggereerd dat waargenomen NO_2 in werkelijkheid wordt beschreven met de volgende formule:

$$\text{NO}_2^{\text{obs}} \sim \text{NO}_2 + \text{Alkyl-Nitrates} + 0.95 \text{ PAN} + 0.35 \text{ HNO}_3$$

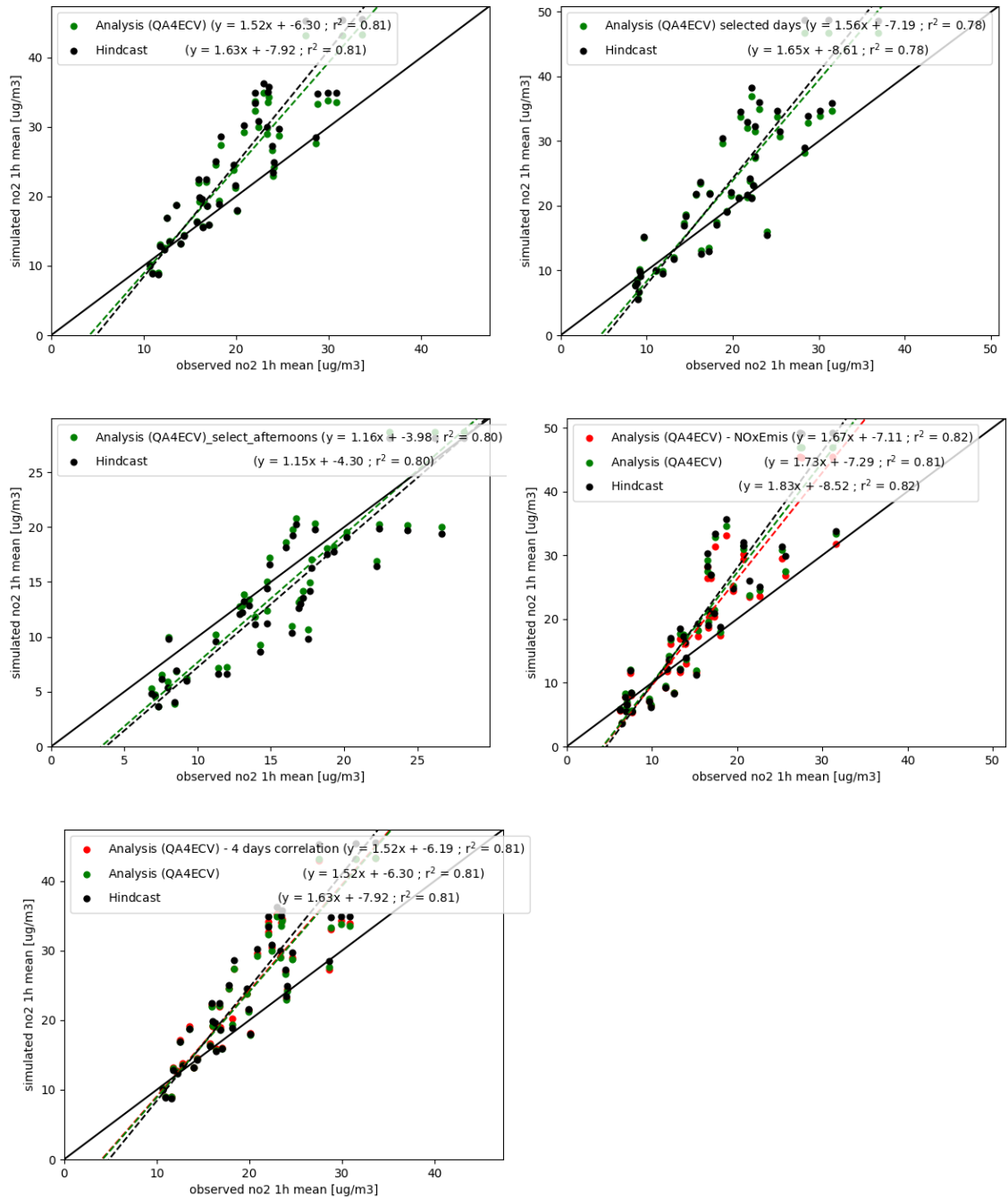
Daarom hebben we voor een nauwkeurige vergelijking met waargenomen NO_2 PAN en HNO_3 toegevoegd volgens de bovenstaande formule. Alkylnitraten worden niet expliciet gemodelleerd in LOTOS-EUROS en zijn niet in overweging genomen.

2. Een selectie van dagen met meer dan 50% OMI-dekking over Nederland. Dit werd getest om de impact van OMI NO_2 -assimilatie te beoordelen op dagen die over het algemeen helder waren (bedekking met bewolking was relatief laag) en daarom een grotere hoeveelheid metingen bevatten, vergeleken met het gemiddelde over het hele jaar, dat ook veel dagen met veel lagere dekking bevat, vooral tijdens de winter. Voor dit onderzoek werd Nederland gedefinieerd als een rechthoek met de volgende begrenzingen van $3^\circ - 8^\circ$ OL en $50,5^\circ - 53,7^\circ$ NB. In

- totaal 44 dagen in 2014 werden geïdentificeerd die voldeden aan het bovengenoemde criterium.
3. Een selectie van dagen met meer dan 50% OMI-dekking over Nederland, maar met de nadruk op een vergelijking met observaties alleen in de namiddag (tussen 13:00 en 19:00 uur lokale tijd), dat wil zeggen vlak na de OMI-overkomst om 13:30 uur lokale tijd. In de namiddag verwachten we dat de impact van de assimilatie het grootst is.
 4. Gebruik van alleen de NO_x-emissies als ruisparameter in het Ensemble Kalman-filter. Normaal gesproken worden ook VOC-emissies, ozonverwijdering (depositie) en ozonrandvoorwaarden gebruikt. Deze gevoeligheidsrun werd uitgevoerd voor een ononderbroken periode met een grote OMI-gegevensdekking (op basis van het bovengenoemde criterium van meer dan 50% bedekking). De geselecteerde periode was 6-13 juni 2014, aangezien 6, 8, 10, 11 en 13 juni dagen waren die voldeden aan de vereisten.
 5. Gebruik een tijdcorrelatie-interval van vier dagen in plaats van één dag voor het hele jaar 2014. Dit vergroot de invloed van individuele metingen in de assimilatie.

De resultaten van de verschillende simulaties worden weergegeven in de vorm van spreidingsdiagrammen in Figuur 16.

Ten eerste bleek de aanpassing van het gemodelleerde NO₂ door het toevoegen van extra N-verbindingen (zodat deze beter vergelijkbaar zijn met grondmetingen; simulatie 1) slechts een miniem effect op de scores te hebben. Daarom werd deze aanpassing in dit rapport niet verder onderzocht. De simulaties voor dagen met een grotere OMI-bedekking (simulatie 2) wijzen op een consistente verbetering, zowel voor stations met een overschatting en onderschatting van de concentraties. Hoewel de verklaarde variantie R^2 constant blijft, verbetert de helling van de regressielijn (Figuur 16, rechtsboven). Tijdens de middaguren van de bovengenoemde geselecteerde dagen (simulatie 3) lijkt de impact van de OMI-assimilatie niet systematisch een verbetering te zijn (links-midden), alhoewel de R^2 en de helling in vergelijking met simulatie 2 verbeterd zijn. Het gebruik van alleen NO_x-emissies als een ruisparameter in het EnKF (simulatie 4) leidt tot een grotere verbetering van de scores dan wanneer alle ruisparameters worden gebruikt (rechts-midden). Er moet echter worden opgemerkt dat dit een resultaat is dat alleen is gebaseerd op de maand juni en niet op het volledige jaar. Ten slotte brengt het verhogen van de temporele correlatie van 1 (standaard) naar vier dagen (simulatie 5, linksonder) een verwaarloosbaar effect op de assimilatiresultaten teweeg, wat suggereert dat deze parameter van ondergeschikt belang is voor de tijdschalen van de processen die de concentraties van NO_x in de troposfeer bepalen.



Figuur 16. Spreidingsdiagram voor jaargemiddeld NO₂ aan de grond op Nederlandse stations. Linksboven: referentiesimulatie. Rechtsboven: simulatie 2 (voor dagen met een hoge OMI-bedekkingsgraad. Links-midden: simulatie 3 (in de namiddag voor dagen met een hoge OMI-bedekkingsgraad). Rechts-midden: simulatie 4 (in juni, met alleen NO_x-emissies als ruisparameter). Links-onder: simulatie 5 (met een tijdcorrelatie van vier dagen). De lineaire regressie is uitgevoerd voor elke dataset (hindcast: zwart, analyse: groen; als er twee kleuren aanwezig zijn, dan is groen de analyse voor de referentiesimulatie, rood de analyse voor de extra simulatie) en de lijnen worden beschreven in de legenda.

7 Discussie

Vraagstelling

De vraagstelling van deze haalbaarheidsstudie is: kan de jaarlijkse GCN-kaart van Nederland *beter* of *goedkoper* worden geproduceerd wanneer gebruikgemaakt wordt van satellietmetingen? Deze vraag is ingegeven door de gedachte dat de satellietmetingen mogelijk een deel van de grondmetingen zouden kunnen vervangen.

Aanpak

Bij de standaardproductie wordt de GCN-kaart geproduceerd met behulp van het model OPS, en wordt de kaart daarna gekalibreerd met behulp van de grondstations van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit, aangevuld met grondstations van de DCMR en GGD-Amsterdam. De alternatieve aanpak maakt gebruik van een ander model, LOTOS-EUROS. In LOTOS-EUROS worden grondmetingen en satellietmetingen van stikstofdioxide *geassimileerd*. Dit wil zeggen dat het model tijdens de berekeningen voortdurend wordt bijgestuurd door de metingen. Dit is niet mogelijk met het OPS-model.

Rekenresolutie

De standaard GCN-kaart wordt berekend voor heel Nederland en heeft een resolutie van $1 \times 1 \text{ km}^2$. Voor deze studie is de resolutie echter teruggebracht tot $7 \times 7 \text{ km}^2$. Er waren meerdere redenen hiervoor. Ten eerste is de *footprint* van de satelliet met $24 \times 13 \text{ km}^2$ zodanig dat gradiënten op een $1 \times 1 \text{ km}^2$ -schaal niet opgepikt worden in de satellietdata. Daarnaast wordt in deze studie uurlijks gerekend met een ensemble Kalman-filter. Dat betekent dat er vijftien simulaties simultaan berekend worden, wat met LOTOS-EUROS op $1 \times 1 \text{ km}^2$ een te grote rekeninspanning zou zijn geweest.

GCN-kaarten

GCN-kaarten zijn gemaakt met OPS en LOTOS-EUROS. Beide modellen gebruiken in deze studie hetzelfde emissiebestand. De ECMWF-meteorologie die door LOTOS-EUROS wordt gebruikt is geassimileerd met de KNMI-waarnemingen die door OPS gebruikt worden.

In deze studie is een aantal verschillende GCN-kaarten geproduceerd:

- OPS, zonder na-kalibratie, op $1 \times 1 \text{ km}^2$;
- OPS, zonder na-kalibratie, geaggregeerd naar $7 \times 7 \text{ km}^2$;
- OPS, met na-kalibratie met behulp van grondmetingen, op $1 \times 1 \text{ km}^2$ (standaard GCN-kaart);
- OPS, met na-kalibratie met behulp van grondmetingen, geaggregeerd naar $7 \times 7 \text{ km}^2$ (referentiekaart voor deze studie);
- LOTOS-EUROS, zonder assimilatie van metingen;
- LOTOS-EUROS, met assimilatie van grondmetingen;
- LOTOS-EUROS, met assimilatie van satellietmetingen (OMI).

Kwaliteit

De eerste deelvraag luidt: Wordt het resultaat *beter* bij gebruik van satellietdata? Hiervoor kijken we naar de kwaliteit van de geproduceerde kaarten.

Toetssteen bij het vergelijken van de kwaliteit van deze kaarten zijn de Nederlandse metingen op leefniveau. De feitelijke meting van het station wordt vergeleken met het modelresultaat van de gridcel waarin het meetstation zich bevindt. Deze vergelijking vindt plaats middels een 'scatterplot' door de oorsprong, waaruit met behulp van lineaire regressie de regressiecoëfficiënt en de verklaarde variantie R^2 worden bepaald; ook wordt de gemiddelde kwadratische fout RMSE berekend (zie bijlage C).

De regressiecoëfficiënt geeft aan of de gemodelleerde waarden systematisch hoger of lager zijn dan de metingen. Idealiter is de waarde 1. Hoe groter het verschil met 1, hoe meer het model afwijkt van de metingen.

De verklaarde variantie (R^2) is een zogenoemde *goodness-of-fit*-maat. Deze maat geeft uitdrukking aan hoe goed de gemodelleerde data clusteren rond de geschatte regressielijn. De verklaarde variantie is 1 als alle datapunten op de regressielijn liggen en 0 als er geen samenhang is tussen model en meting.

RMSE is de gemiddelde kwadratische fout in $\mu\text{g}/\text{m}^3$; als het model perfect aansluit bij de metingen is de RMSE gelijk aan 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabel 2. Vergelijking van de resultaten van de verschillende runs. De kwaliteit van het jaargemiddelde modelresultaat wordt afgemeten aan de hand van de vergelijking met jaargemiddelde metingen op leefniveau ('grondmetingen') door middel van regressiecoëfficiënt, verklaarde variantie en RMSE (zie tekst). In grijs de waarden voor de GCN-kaart die geldt als referentie.

Model	Extra's	Regressie-coëfficiënt; vergelijking met grondmetingen (target = 1)	Verklaarde variantie R^2 ; vergelijking met grondmetingen (target = 1)	RMSE $\mu\text{g}/\text{m}^3$; vergelijking met grondmetingen (target = 0)	Opmerkingen
OPS 1x1 km ²	Alleen bronnen en meteo	1.05	0.93	1.99	Figuur 6
OPS 1x1 km ²	+ kalibratie met grondmetingen	1.00	0.98	0.94	Standaard GCN-kaart. Figuur 8
OPS 7x7 km ²	Alleen bronnen en meteo	1.05	0.84	2.68	Figuur 6
OPS 7x7 km ²	+ kalibratie met grondmetingen	1.00	0.89	2.00	Referentie voor deze studie; Figuur 8
LOTOS-EUROS 7x7 km ² (TNO)	Alleen bronnen en meteo	0.98	0.81	3.15	Figuur 11
LOTOS-EUROS 7x7 km ² (TNO)	+ assimilatie grondmetingen	0.98	0.89	2.00	Figuur 11
LOTOS-EUROS 7x7 km ² (KNMI)	Alleen bronnen en meteo	0.93	0.80	3.44	Figuur 14
LOTOS-EUROS 7x7 km ² (KNMI)	+ assimilatie satelliet-metingen	0.92	0.81	3.38	Figuur 14

Basisruns

Wanneer we de scores van de basisruns met vergelijkbare resolutie (7x7 km²) vergelijken, dan zien we dat de verklaarde variantie en RMSE van OPS (0.84 / 2.68 µg/m³) licht beter zijn dan die van LOTOS-EUROS (0.81 / 3.15 µg/m³). De regressiecoëfficiënten zijn in beide gevallen dicht bij 1.

Effect van rekenresolutie

OPS-simulaties op 1x1 km² laten meer ruimtelijk detail in het resultaat zien voor het kortlevende NO₂. De kwaliteit van de simulatie op deze resolutie is substantieel beter dan die op 7x7 km²; R^2 gaat met OPS van 0.98 naar 0.89 (RMSE van 0.94 naar 2.00 µg/m³), alleen door dit resolutie-effect. Het is daarom nodig om in een vervolgstudie een resolutie van 1x1 km² te kiezen. Voor LOTOS-EUROS met ENKF is dit een hele uitdaging, aangezien de rekentijd dan sterk toeneemt. Het gebruik van simpelere assimilatie- en/of kalibratietechnieken zoals (3D-VAR, OI) zou verkend kunnen worden.

Effect grondmetingen

Zowel de kalibratie van OPS met metingen als de assimilatie van de tijdreeksen in LOTOS-EUROS leidt tot een verbetering van de overeenkomst tussen model en meting. De verklaarde variantie verbetert in beide gevallen naar 0.89. De assimilatie van LOTOS-EUROS trekt het model richting de metingen, maar reduceert de bias gemiddeld niet naar 0. Dit is sterker het geval bij de kalibratie met OPS, hetgeen de grotere impact kan verklaren. Het dient dan ook de aanbeveling de jaargemiddelde velden van LOTOS-EUROS in een volgende studie aan het kalibratieproces van de OPS-GCN te voeden.

Effect satellietmetingen

De assimilatie van OMI NO₂-troposferische kolommen voegt nieuwe informatie toe aan het systeem die tot een meetbare, zij het kleine verbetering van de scores leidt. Voor NO₂ is dit duidelijker in stations die het meest afwijken van de waargenomen waarden aan het oppervlak en die duiden op ontbrekende bronnen of processen. Volgens verwachting laten de dagen met beschikbare OMI-gegevens ook een relatief grotere verbetering zien.

Conclusie kwaliteit

De resultaten met LOTOS-EUROS en OPS in deze studie zijn heel goed, waarbij OPS een licht betere performance laat zien. Het OPS-model is gedurende decennia specifiek toegesneden op de GCN-productie, waardoor het de jaargemiddelden op de meetstations nagenoeg perfect modelleert. Voor het gebruik van LOTOS-EUROS, dat niet specifiek op deze taak is ingericht, kan er dus geleerd worden van de GCN-aanpak met OPS om een op Nederland toegespitste versie te maken. Conclusie is echter wel dat het maken van de GCN-kaart met LOTOS-EUROS en assimilatie van grond- en satellietmetingen op dit moment niet beter werkt dan de standaardaanpak met OPS. Een verhoging van de modelonzekerheid in de huidige GCN-kaart wordt door gebruikers als onacceptabel gezien.

Kosten

De tweede deelvraag gaat over de kosten. Is de productie met het alternatieve scenario goedkoper?

Op voorhand is duidelijk dat de belangrijkste kans op besparingen gelegen is in het mogelijk terugbrengen van het aantal NO₂-metingen in het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit. Hun rol zou namelijk wellicht kunnen worden overgenomen door de nieuwe satellietmetingen van NO₂. Kortom: de tweede deelvraag vertaalt zich naar: Kan de alternatieve aanpak toe met minder grondmetingen dan de standaardaanpak?

Zowel OPS als LOTOS-EUROS hebben duidelijk baat bij de kalibratie/assimilatie met meetgegevens van grondstations, en ongeveer in gelijke mate. Voor de productie van de GCN-kaart blijkt de satelliet slechts heel beperkt informatie toe te voegen. Het weglaten van grondstations verslechtert de GCN-kaart; satellietmetingen kunnen dat op dit moment niet opvangen. Ook op de tweede deelvraag vinden we dus een negatief antwoord: de GCN-kaart kan gebruikmakend van satellietdata niet goedkoper worden geproduceerd.

Beperkte invloed satellietmetingen

Het is van belang om na te gaan waarom de bijdrage van de satellietmetingen aan de productie van de GCN-kaart beperkt blijkt. Bij de gevoeligheidsstudies is hier de nodige aandacht aan besteed. De belangrijkste redenen zijn:

- Er is maximaal één satellietmeting per dag, op een vast tijdstip rond 13:30 uur. De metingen van het grondmeetnet zijn daarentegen 24 uur van de dag beschikbaar.
- Door de *row anomaly* van OMI is de bedekking nog eens met een factor 2 afgenomen.
- Er zijn alleen meetresultaten wanneer een pixel onbewolkt is. Met de pixelgrootte van OMI (13x24 km² in nadir, oppervlak van de metingen is 500 km² gemiddeld) betekent dit dat de meeste dagen geen landdekkend beeld verkregen wordt, en dat op een flink aantal dagen helemaal geen satellietdata beschikbaar zijn om te assimileren. Bovenstaande drie punten resulteren in een beschikbaarheid van ongeveer één meting per vier dagen. De veel kleinere pixel van TROPOMI zal deze statistiek aanzienlijk verbeteren.
- Het tijdstip van de OMI-meting valt niet samen met de hoogste concentraties. Deze treden op tijdens de ochtendspits en in iets mindere mate tijdens de avondspits. De satelliet ziet de hoogste concentraties dus nooit.
- De levensduur van NO₂ in de atmosfeer is kort, typisch vier uur. Dit betekent dat de waarde van een meting voor de assimilatie snel afneemt met de tijd. Hierdoor hebben satellietwaarnemingen van bijvoorbeeld een dag eerder elders in Europa (die de satelliet wel kan leveren) beperkte impact. Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld satellietmetingen van aerosolen, die veel langer leven.
- De satelliet meet troposferische kolommen van NO₂, geen concentraties op grondniveau. Via het model worden deze omgezet in grondconcentraties, die gebruikt worden voor de

GCN-kaart. Met name in de buurt van bronnen, zoals het wegennet, zijn de kolommen niet homogeen gemengd en is de vertaling van satellietkolom naar grondconcentratie lastiger.

Voordelen satellietmetingen

Daarnaast hebben de satellietmetingen ook voordelen ten opzichte van het grondnetwerk:

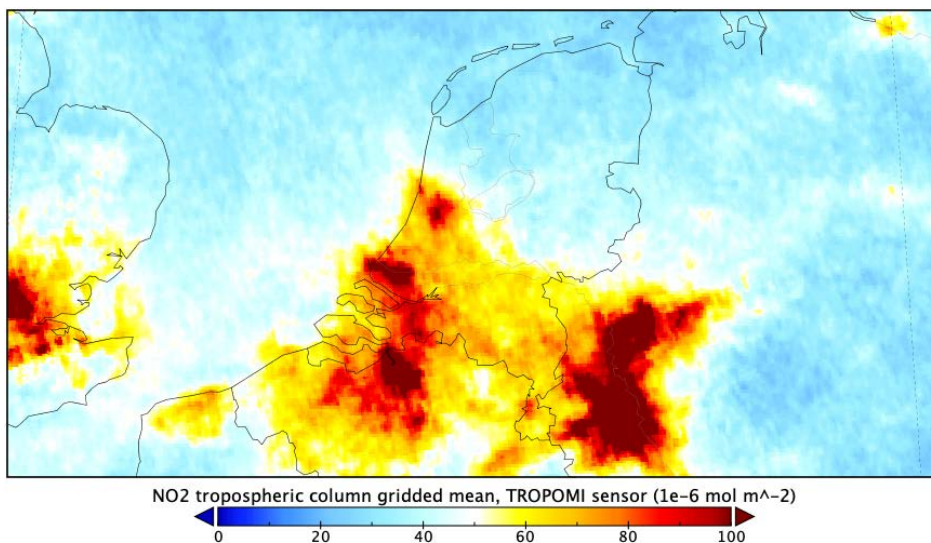
- De satelliet meet overal, terwijl het grondnetwerk beperkt is tot een aantal tientallen locaties in Nederland. De potentie van satellietmetingen is het invullen van de gaten tussen de stations.
- Satellietmetingen kunnen gebruikt worden voor het verbeteren van de ruimtelijke verdeling en tijdsevolutie van de emissies.

Data-assimilatie

De gassen NO en NO₂ zijn gekarakteriseerd door een grote ruimtelijke en temporele variabiliteit door de verdeling van de bronnen in combinatie met een relatief korte atmosferische levensduur als gevolg van chemie. Het directe voordeel van de Kalman-filterbenadering die in deze studie gebruikt wordt, is dat het opeenvolgende instantane emissieschattingen produceert, in principe meerdere keren per dag, wat details kan geven over de ruimtelijke en temporele evolutie van zowel emissies als concentraties.

TROPOMI

Het assimileren van de NO₂-metingen van het instrument TROPOMI leidt naar verwachting tot sterk verbeterde prestaties in vergelijking met OMI, aangezien het veel meer ruimtelijke informatie bevat. TROPOMI heeft een aanzienlijk hogere horizontale resolutie dan OMI (40 km² vergeleken met 500 km² voor OMI), een betere dekking (geen probleem met 'row anomalies', meer wolkvrije pixels) en een betere signaal-ruis-verhouding.



Figuur 17. TROPOMI NO₂-metingen, gemiddeld over de maand juli 2018. De hoeveelheid detail is sterk toegenomen ten opzichte van OMI, en op de kaart zijn de emissies van onder andere IJmuiden, Schiphol en de Rotterdamse havens individueel waarneembaar.

8 Conclusies

In het voorliggend onderzoek is een alternatieve aanpak onderzocht voor de productie van de GCN-kaart voor stikstofdioxide. RIVM maakt deze kaart jaarlijks. De kaart wordt gebruikt in de luchtkwaliteitsregelgeving op nationaal, regionaal en gemeentelijk niveau. De alternatieve aanpak maakt gebruik van satellietmetingen, een nieuwe bron van informatie over de luchtkwaliteit in Nederland.

Vraagstelling bij het onderzoek was of de jaarlijkse GCN-kaart beter en/of goedkoper kan worden geproduceerd bij gebruikmaking van satellietmetingen. Het onderzoek heeft uitgewezen dat op dit moment de alternatieve aanpak met satellietmetingen noch beter, noch goedkoper is dan de standaardaanpak, waarbij grondmetingen worden gebruikt.

Bij deze conclusie past een aantal kanttekeningen. De conclusie is gebaseerd op:

- een gemodelleerde kaartresolutie van 7 bij 7 km²;
- gebruik van metingen van het OMI-instrument, met een oplossend vermogen van maximaal 7 bij 23 km²;
- het peiljaar 2014. Hierbij moet in aanmerking worden genomen dat de kwaliteit van de OMI-metingen in 2014 door uitval van delen van het instrument niet meer optimaal was.

Inmiddels is ter vervanging van OMI de opvolger TROPOMI gelanceerd. De data van dit instrument zijn sinds de zomer van 2018 beschikbaar. TROPOMI heeft een veel hogere resolutie van 3,5 bij 7 km² en een hogere gevoeligheid. Voorts wordt de modelresolutie van LOTOS-EUROS opgevoerd naar 1 bij 1 km². Beide aspecten bieden uitzicht op een aanzienlijke verbetering van het alternatieve GCN-product uit deze studie. Overwogen moet worden om deze studie te herhalen met TROPOMI-metingen. Dit kan vanaf medio 2019, na afloop van het eerste volledige jaar van TROPOMI-metingen.

Ten slotte wijzen de onderzoekers erop dat het gevonden resultaat geenszins betekent dat satellietmetingen in bredere zin geen zinvolle bijdrage kunnen leveren aan het meten en modelleren van de luchtkwaliteit:

- Voor de productie van de GCN-kaart is de standaardmethode in de loop van tientallen jaren ontwikkeld en aangescherpt. Dit verbetertraject heeft de alternatieve methode nog voor zich.
- Daarnaast leunt de standaardmethode sterk op de beschikbaarheid van een gedetailleerd en actueel emissiebestand en een gedetailleerde meteorologie, een voorwaarde die in Nederland vervuld is, maar in de rest van de wereld vaak veel minder.
- Ten slotte zijn er legio andere toepassingen dan de GCN-kaart aan te geven waarbij de satellietinstrumenten zinvolle extra informatie kunnen bijdragen. Het vermogen om met één instrument dagelijks wereldwijd overal te kunnen meten speelt hierbij vaak een belangrijke rol. Te denken valt hierbij aan

luchtkwaliteitsverwachtingen en -analyses, het maken van wereldwijde emissieschattingen en het identificeren van onbekende bronnen. Bij het RIVM worden OMI-metingen op dit moment reeds gebruikt voor de luchtkwaliteitsverwachting; in 2019 wordt gewerkt aan toepassingen van TROPOMI-data bij het modelleren van luchtkwaliteit op hoge resolutie.

9 Referenties

Boersma, K.F., Eskes, H.J., Richter, A., De Smedt, I., Lorente, A., Beirle, S., van Geffen, J.H.G.M., Zara, M., Peters, E., Van Roozendaal, M., Wagner, T., Maasakkers, J.D., van der A, R.J., Nightingale, J., De Rudder, A., Irie, H., Pinardi, G., Lambert, J.-C., en Compernelle, S.: *Improving algorithms and uncertainty estimates for satellite NO₂ retrievals: Results from the Quality Assurance for Essential Climate Variables (QA4ECV) project*, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/amt-2018-200>, in review, 2018.

Curier, R.L., Timmermans, R., Calabretta-Jongen, S., Eskes, H., Segers, A., Swart, D., en Schaap, M.: *Improving ozone forecasts over Europe by synergistic use of the LOTOS-EUROS chemical transport model and in-situ measurements*, *Atmos. Environ.*, 60, 217–226, 2012.

Curier, R.L., Kranenburg, R., Segers, A.J.S., Timmermans, R.M.A., Schaap, M.: *Synergistic use of OMI NO₂ tropospheric columns and LOTOS-EUROS to evaluate the NO_x emission trends across Europe*. *Remote Sensing of Environment* 149, 58–69, 2014.

Jaarsveld, J.A. van (2004), *The Operational Priority Substances Model*, RIVM-rapport 500045001, Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.

Lamsal, L.N., R.V. Martin, A. van Donkelaar, M. Steinbacher, E.A. Celarier, E. Bucsela, E.J. Dunlea, J.P. Pinto (2008), *Ground-level nitrogen dioxide concentrations inferred from the satellite-borne Ozone Monitoring Instrument*, *J. Geophys. Res.*, 113, D16308, doi: 10.1029/2007JD009235.

Levelt, P.F., Joiner, J., Tamminen, J., Veefkind, J.P., Bhartia, P.K., Stein Zweers, D.C., Duncan, B.N., Streets, D.G., Eskes, H., van der A, R., McLinden, C., Fioletov, V., Carn, S., de Laat, J., DeLand, M., Marchenko, S., McPeters, R., Ziemke, J., Fu, D., Liu, X., Pickering, K., Apituley, A., González Abad, G., Arola, A., Boersma, F., Chan Miller, C., Chance, K., de Graaf, M., Hakkarainen, J., Hassinen, S., Ialongo, I., Kleipool, Q., Krotkov, N., Li, C., Lamsal, L., Newman, P., Nowlan, C., Suleiman, R., Tilstra, L.G., Torres, O., Wang, H., Wargan, K. (2018): *The Ozone Monitoring Instrument: overview of 14 years in space*, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 18, nr. 8, pp. 5699-5745, <https://www.atmos-chem-phys.net/18/5699/2018/>, doi 10.5194/acp-18-5699-2018, 2018

LML, *Landelijk meetnet luchtkwaliteit* (2018), Bilthoven, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu: www.rivm.nl/lml.

Loon, M. van, Builtjes, P.J.H., Segers, A.J.: *Data assimilation of ozone in the atmospheric transport chemistry model LOTOS*. *Environmental Modelling and Software*, 15 (6-7 SPEC. ISS), pp. 603-609, 2000.

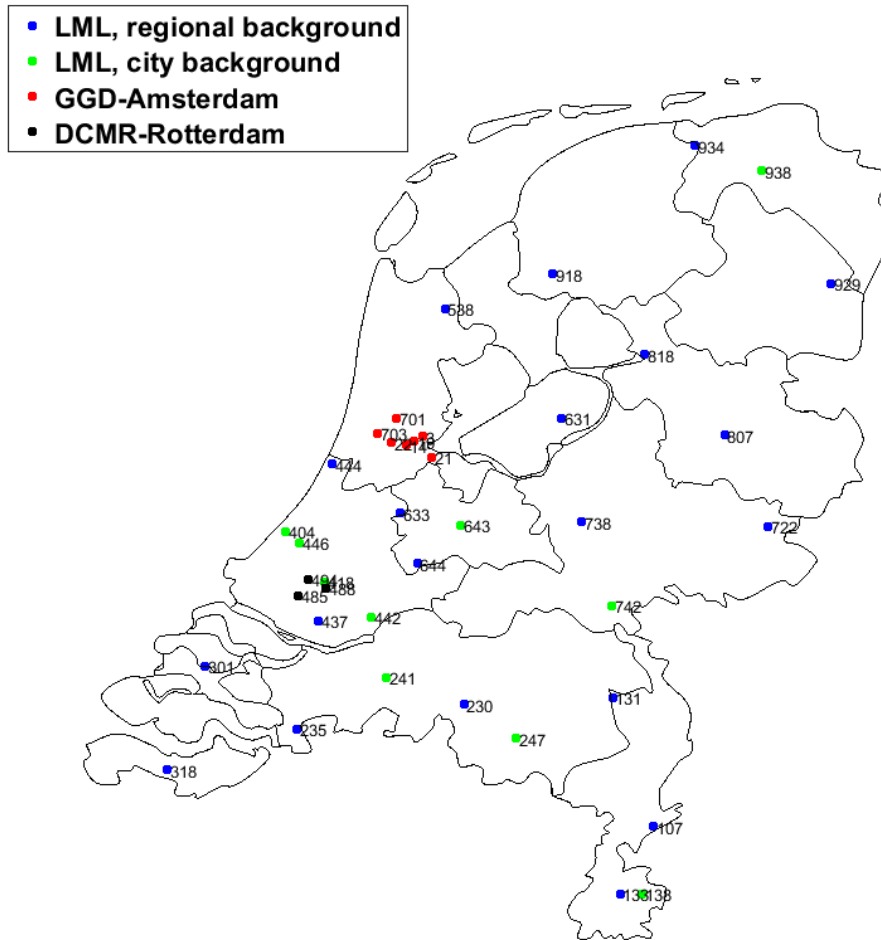
Manders, A.M.M., Bultjes, P.J.H., Curier, L., Denier van der Gon, H.A.C., Hendriks, C., Jonkers, S., Kranenburg, R., Kuenen, J.J.P., Segers, A.J., Timmermans, R.M.A., Visschedijk, A.J.H., Wichink Kruit, R.J., van Pul, W.A.J., Sauter, F.J., van der Swaluw, E., Swart, D.P.J., Douros, J., Eskes, H., van Meijgaard, E., van Uift, B., van Velthoven, P., Banzhaf, S., Mues, A.C., Stern, R., Fu, G., Lu, S., Heemink, A., van Velzen, N., en Schaap, M.: *Curriculum vitae of the LOTOS–EUROS (v2.0) chemistry transport model*, *Geosci. Model Dev.*, 10, 4145-4173, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4145-2017>, 2017.

Mooibroek, D., J.P.J. Berkhout, R. Hoogerbrugge (2014), *Jaaroverzicht luchtkwaliteit 2013*, RIVM-rapport 2014-0111, Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.

Sauter, F., M. van Zanten, E. van der Swaluw, J. Aben, F. de Leeuw, H. van Jaarsveld (2015), *The OPS-model. Description of OPS 4.5.0*, Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, <http://www.rivm.nl/media/ops/OPS-model.pdf>

Velders, G.J.M., J.M.M. Aben, B.A. G.P. Geilenkirchen, H.A. den Hollander, H. Noordijk, E. van der Swaluw et al., W.J. de Vries, J. Wesseling, M.C. van Zanten (2014), *Grootschalige concentratie- en depositiekaarten Nederland, Rapportage 2014*, RIVM-rapport 680363002, Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.

Bijlage A. Meetstations, gebruikt in kalibratieproces van NO₂



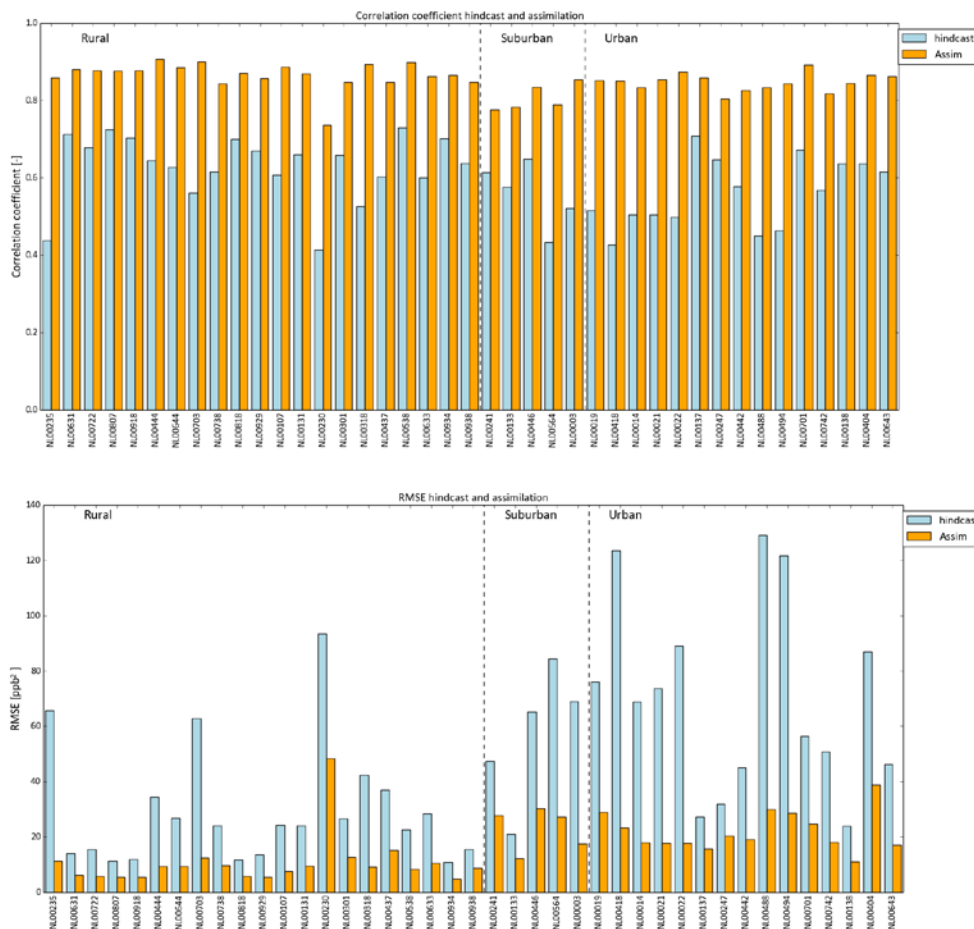
In onderstaande tabel staan de volgende stationsgegevens:
stationsnummer, x- en y-coördinaat in hectometer (Rijksdriehoek-
stelsel), x- en y-coördinaat in meter, stationsnaam.

NR	X(hm)	Y(hm)	X(m)	Y(m)	NAAM
LML REGIONALE ACHTERGROND STATIONS					
NL00107	2009	3479	200900	347900	Posterholt - Vlodroppeeweg
NL00131	1873	3947	187300	394700	Vredepeel - Vredeweg
NL00133	1898	3237	189800	323700	Wijnandsrade - Opfergeltstraat
NL00230	1384	3922	138400	392200	Biest Houtakker - Biestsestraat
NL00235	836	3833	83600	383300	Huijbergen - Vennekenstraat
NL00301	532	4061	53200	406100	Zierikzee - Lange Slikweg
NL00318	408	3685	40800	368500	Philippine - Stelleweg
NL00437	904	4224	90400	422400	Westmaas - Groeneweg
NL00444	952	4791	95200	479100	De Zilk - Vogelaarsdreef
NL00538	1322	5352	132200	535200	Wieringerwerf - Medemblikkerweg
NL00631	1707	4957	170700	495700	Biddinghuizen - Hoekwantweg
NL00633	1174	4613	117400	461300	Zegveld - Oude Meije
NL00644	1231	4430	123134	443016	Cabauw - Wielsekade
NL00722	2385	4566	238500	456600	Eibergen - Lintveldseweg
NL00738	1770	4582	176990	458220	Wekerom - Riemterdijk
NL00807	2242	4895	224200	489500	Hellendoorn - Luttenbergerweg
NL00818	1977	5187	197700	518700	Barsbeek - De Veenen
NL00918	1676	5479	167600	547900	Balk - Trophornsterweg
NL00929	2591	5443	259100	544300	Valthermond - Noorderdiep
NL00934	2143	5942	214300	594200	Kollumerwaard - Hooge Zuidwal
LML STEDELIJKE ACHTERGRONDSTATIONS					
NL00138	1972	3236	197185	323565	Heerlen - Jamboreepad
NL00241	1130	4018	112990	401770	Breda - Bastenakenstraat
NL00247	1555	3798	155481	379824	Veldhoven - Europalaan
NL00404	796	4547	79600	454700	Den Haag - Rebecquestraat
NL00418	926	4366	92600	436600	Rotterdam - Schiedamsevest
NL00442	1081	4237	108142	423671	Dordrecht-Bamendaweg
NL00446	845	4505	84482	450542	Den Haag - Bleriotlaan
NL00643	1373	4570	137254	457033	Utrecht - Griffpark
NL00742	1872	4278	187200	427800	Nijmegen - Ruyterstraat
NL00938	2366	5851	236556	585140	Groningen - Nijensteinheerd
GGD-Amsterdam stations					
NL00003	1248	4891			Nieuwendammerdijk
NL00014	1195	4859			Overtoom
NL00019	1221	4872			Oude Schans
NL00021	1278	4815			Kantershof Zuid-Oost
NL00022	1146	4867			Sportpark Ookmeer
NL00701	1162	4957			Zaandam
NL00703	1102	4903			Spaarnewoude
DCMR-Rotterdam stations					
NL00485	839	4315	83926	431490	Stad (= DCMR 1191)
NL00488	931	4343	93080	434286	Stad
NL00494	872	4374	87185	437449	Stad (= DCMR 1119)

Bijlage B. Statistische analyse van uurlijkse concentraties

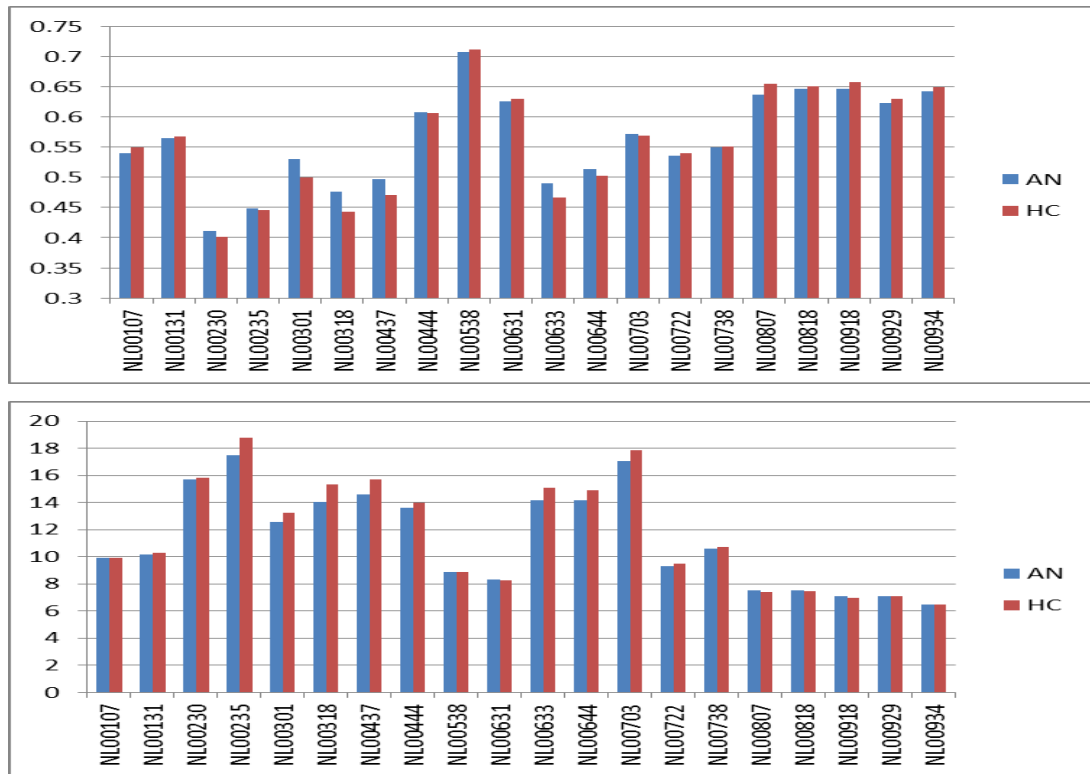
Voor de uur-voor-uur-berekeningen van LOTOS-EUROS kunnen per meetstation de tijdscorelatie en de *root mean square error* RMSE berekend worden. Omdat OPS direct jaargemiddelde concentraties uitrekt, als een gewogen gemiddelde van concentraties bij typisch meteorologische situaties, kunnen deze statistische parameters niet met OPS berekend worden; ze zijn ook niet direct van belang in de context van jaargemiddelde GCN-kaarten.

In Figuur 18 wordt het effect getoond van de assimilatie van grondmetingen op deze twee statistische parameters: op vrijwel alle stations geeft de assimilatie een verbetering. RMSE geeft een grotere verbetering voor de urbane stations, waarbij deze stations natuurlijk hogere concentraties hebben, dus absoluut gezien ook grotere verschillen. De tijdscorelatiecoëfficiënten geven ook duidelijke verbeteringen te zien. De urbane stations hebben de grootste verbetering, waardoor voor alle stations de tijdscorelatie na assimilatie uitkomt rond 0.83.



Figuur 18. Tijdscorelatiecoëfficiënt (boven) en root mean square error RMSE in ppb (onder) op Nederlandse meetstations voor de vrije LOTOS-EUROS run (blauw) en na assimilatie van grondmetingen (oranje).

Figuur 19 laat het effect zien van de assimilatie van satellietmetingen. De effecten zijn duidelijk veel minder groot dan bij de assimilatie van grondmetingen. De grootste verbetering van de tijdscorelatiecoëfficiënt zien we bij stations met slechtste correlaties in de *hindcast*.



Figuur 19. Tijdscorelatiecoëfficiënt (boven) en root mean square error RMSE in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (onder) op twintig meetstations voor de vrije LOTOS-EUROS run (HC - rood) en na assimilatie van satellietmetingen (AN - blauw).

Bijlage C. Regressiecoëfficiënt, verklaarde variantie en RMSE

Voor de toetsing van de modellen is gebruikgemaakt van lineaire regressie, geforceerd door de oorsprong. De regressiecoëfficiënt is de richtingscoëfficiënt a van de regressielijn $y = a x$. Voor de verklaarde variantie gebruiken we hier de interpretatie als 'Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency' NSE^2 :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (c_{model}^i - c_{obs}^i)^2}{\sum_{i=1}^N (c_{model}^i - \bar{c}_{obs})^2}.$$

waarin:

c_{model}^i : gemodelleerde concentratie op station i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

c_{obs}^i : gemeten concentratie op station i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

\bar{c}_{obs} : gemiddelde van de concentraties over alle N -stations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

De NSE is een zogenoemde *goodness-of-fit*-maat. Deze maat geeft uitdrukking aan hoe goed de gemodelleerde data clusteren rond de geschatte regressielijn. Voor lineaire regressie zonder as-afsnede (niet forceren door de oorsprong) ligt de verklaarde variantie tussen 0 en 1. In dit geval is de verklaarde variantie = $NSE = R^2$, met R de correlatiecoëfficiënt.

Bij forcering van de regressielijn door de oorsprong, zoals in dit onderzoek, ligt de NSE tussen $-\infty$ en 1. Een $NSE = 1$ geeft aan dat de gemodelleerde concentraties perfect overeenkomen met de observaties. Een efficiency van 0 geeft aan dat het modelresultaat net zo nauwkeurig is als het gemiddelde van de gemeten data; het lineaire model voegt in dit geval niets toe ten opzichte van het beste constante model $c_{model}^i = \bar{c}_{obs}$. Een negatieve efficiency geeft aan dat het gemiddelde van de metingen een betere schatting geeft dan de gemodelleerde concentraties. Hoewel de verklaarde variantie dus negatief kan worden, gebruiken we in dit rapport nog wel de afkorting R^2 .

De $RMSE$ (*Root Mean Square Error* in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) is de wortel uit het gemiddelde van de gekwadrateerde verschillen tussen het model en de metingen:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (c_{model}^i - c_{obs}^i)^2}.$$

² Nash J. en J. Sutcliffe e (1970). *River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles*. *Journal of Hydrology* 10 nr. 3, pag. 282-290.

RIVM

De zorg voor morgen begint vandaag