

**Circular Economy &
Environment**

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

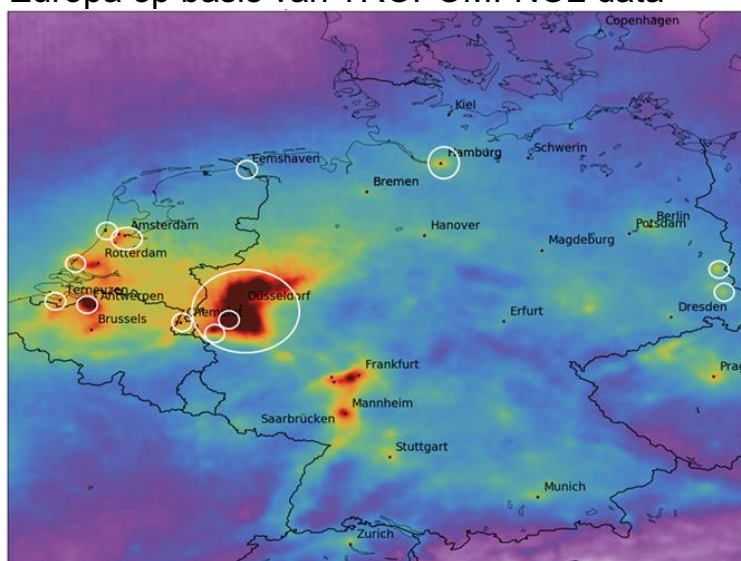
www.tno.nl

T +31 88 866 42 56

TNO-rapport

TNO 2021 R10545

**De emissie-intensiteit van Rotterdam-Rijnmond
vergeleken met die van industriegebieden in NW-
Europa op basis van TROPOMI-NO₂ data**



Datum 23 maart 2021

Auteurs

Aantal pagina's 35 (incl. bijlagen)

Aantal bijlagen 1

Opdrachtgever

Provincie Zuid-Holland,

Projectnaam

Stikstof Studie: Bepalen van Emissie-Intensiteit Industrie met
Satellietdata

Projectnummer

060.46147

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2021 TNO

Samenvatting

In dit rapport worden de onderzoeksactiviteiten gepresenteerd die tot doel hadden de volgende vraag te beantwoorden: *“Hoe presteert de industrie in het Rotterdamse Haven en Industrieel complex, in termen van NO_x-uitstoot, in verhouding tot andere grootschalige haven en/of industriële complexen in West-Europees perspectief?”*

Om de vraag te kunnen beantwoorden is in dit onderzoek gebruik gemaakt van satellietwaarnemingen van NO₂ van het TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) satellietinstrument. De satellietwaarnemingen zijn gebruikt om de emissies voor specifieke industriële complexen (doelregio's) te berekenen. TROPOMI is een instrument dat onderdeel is van de Sentinel-5p satellietmissie van de Europese ruimtevaartorganisatie ESA die dagelijks en wereldwijd luchtvervuiling meet. Het instrument geldt als het nauwkeurigste in zijn soort en is ontwikkeld om luchtvervuiling te meten over grote gebieden. Recente studies laten zien dat het ook gebruikt kan worden om de emissies van bijvoorbeeld stikstofdioxide te meten van grote bronnen.

De geselecteerde doelregio's zijn op basis van een aantal criteria gekozen. De belangrijkste criteria waren de beschikbaarheid van satellietwaarnemingen (sinds midden 2018 tot heden), accurate up-to-date emissie-inventarisaties (2018 meest recente dataset voor NL) en de sterkte van de emissies t.o.v. emissies in de omliggende gebieden. Naast de keuze op de grote havengebieden van Noordwest-Europa (Rijnmond/ Antwerpen /Hamburg) viel de keuze op een aantal kleinere havens (de Westpoort, Eemshaven en Terneuzen). Naast de havengebieden zijn industriële regio's zoals Chemelot, het gebied rond TATA en het Ruhrgebied gekozen die eveneens een hoge emissiedichtheid vertonen. Ter ondersteuning van de relatieve emissiebepaling zijn ook enkele geïsoleerd gelegen energiecentrales in het onderzoek opgenomen (bijv. Vattenfell-Peitz en Boxberg) omdat de emissies hiervan de directe omgeving domineren en fungeren als test voor de performance van de toegepaste satellietmeetmethode.

Er zijn twee methodes toegepast om uit satellietwaarnemingen emissies te berekenen. De eerste is de pluim methode welke in de literatuur vaak wordt gebruikt voor de bepaling van emissie van grote emitters. De tweede methode is de meer experimentele divergentiemethode welke in de literatuur al eerder goede resultaten liet zien in combinatie met de TROPOMI-observaties.

De resultaten van de emissieberekeningen van beide methoden zijn vervolgens vergeleken met de emissiegegevens uit internationaal beschikbare emissieregistraties.

Uit dit onderzoek is gebleken dat de divergentiemethode de beste resultaten laat zien en daarom vatten we hier de resultaten samen op basis van die methode. Tabel S1 en Figuur S1 geven een samenvatting van de gevonden resultaten met de divergentie methode in vergelijking met de internationaal beschikbare emissie-inventarisaties.

In deze studie werd gebruik gemaakt van een samengestelde emissiekaart die is opgebouwd uit de emissies voor Nederland (Emissie Registratie (ER), 2018),

Duitsland (Gridding Emission Tool for ArcGIS (GrETA), 2015, rapportage 2019) en Europa (Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) v4.1).

Tabel S1 Emissies (NO_x) geschat met de divergentie methode voor de doel regio's (gesommeerd voor een gebied rondom de centrale coördinaten van de regio met een oppervlakte van ~550km². Het Ruhrgebied heeft een oppervlakte van ~10 000km². De emissie-totaal worden zowel weergegeven als de totaal emissies binnen het vierkant (grijs, som binnen het gebiedsmasker voor het Ruhrgebied), als emissies per km² (wit). De tweede kolom geeft de emissies zoals deze in de ER/GRETA/CAMS-database zitten. De derde kolom geeft de schatting van TROPOMI met daarbij de onzekerheid op het totaal.

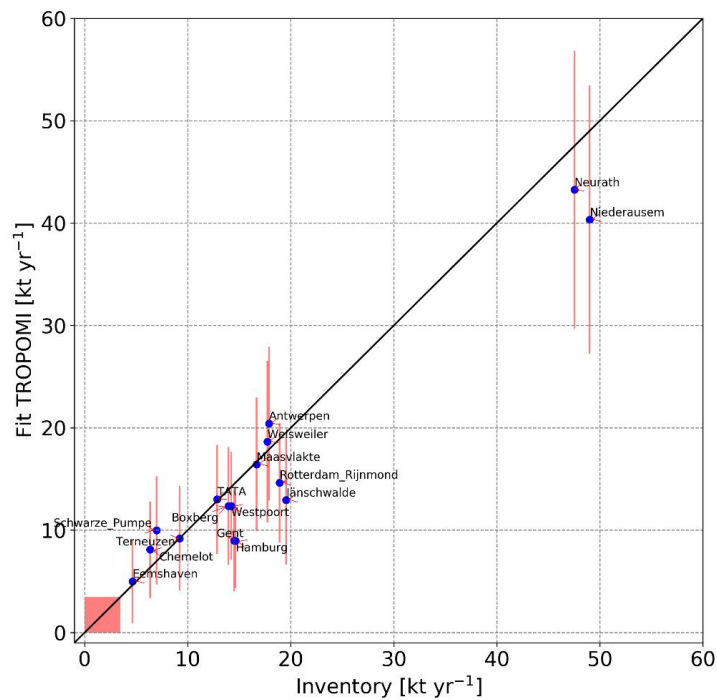
Naam	Emissies inventarisatie ER + GRETA + CAMS		TROPOMI-divergentie methode	
	Kt jaar ⁻¹	Ton km ⁻² jaar ⁻¹	Kt jaar ⁻¹	Ton km ⁻² jaar ⁻¹
Rotterdam-Rijnmond	18.9	35.4	14.6±5.8	27.4±10.9
Maasvlakte	16.7	31.3	16.4±6.5	30.8±12.2
Westpoort	14.2	26.9	12.4±5.3	23.4±10.0
TATA	5.3	24.4	13.0±5.3	24.7±10.1
Eemshaven	4.6	9.0	5.0±4.1	9.7±7.9
Chemelot	6.3	11.6	8.1±4.7	14.9±8.7
Terneuzen	9.2	17.0	9.2±5.1	17.0±9.4
Antwerpen	17.9	33.0	20.4±7.5	37.7±13.8
Gent	14.5	26.7	9.0±5.0	16.5±9.1
Hamburg	14.6	28.5	9.0±4.6	17.4±9.0
Niederausem*	49.0	90.0	40.3±13.1	74.0±24.0
Neurath*	47.5	87.3	43.3±13.6	79.5±24.9
Weisweiler*	17.7	32.4	18.7±7.9	34.1±14.4
Jänschwalde*	19.5	36.5	12.9±6.3	24.2±11.8
Boxberg*	13.9	25.8	12.4±5.8	22.9±10.7
Schwarze Pumpe*	7.0	13.0	10.0±5.3	18.6±9.8
Ruhrgebied	197.6	19.8	159.4±58.0	16.0±5.8

*: Grote energiecentrale in Duitsland

De tabel toont dat de bepaling van de emissies op basis van de satellietwaarnemingen (met in achtname van de onzekerheden) goed overeenkomt met de meest recente emissie-inventarisaties. Dit geldt zowel voor de haven- en industrie gebieden als voor grote individuele puntbronnen.

Uit bovenstaande resultaten kan ook het antwoord op de belangrijkste onderzoeksvraag met betrekking tot de emissiedichtheid worden afgeleid.

De resultaten laten zien dat de emissiedichtheid (in ton NO₂ per km² per jaar in de gebieden Rotterdam Rijnmond en de Maasvlakte vergelijkbaar is met de emissiedichtheid in andere industrie/haven gebieden (zoals Westpoort, Tata en Antwerpen).



Figuur S1 Spreidingsdiagram van de met divergentie methode geschatte emissies en de emissie-inventarisatie (= figuur 8). Het Ruhrgebied is weggelaten uit het spreidingsdiagram zodat de doelregio's beter zichtbaar zijn.

De resultaten van de emissiemetingen met satellietdata volgens divergentie methode (met inachtneming van de onzekerheid daarvan) bevestigen de emissies zoals die volgen uit de officiële emissie-inventarisaties. In die zin kunnen satellietwaarnemingen worden ingezet als een verificatie methode voor emissie-inventarisaties.

Ook voor de sterke puntbronnen zoals TATA en individuele energiecentrales in Duitsland (die in de studie zijn opgenomen als verificatie van de gebruikte satelliet-emissiemethode) laten de resultaten zien dat de methode werkt zoals verwacht.

Een aantal van de regio's, de havengebieden Rotterdam-Rijnmond, Hamburg, Gent, en Westpoort laten een lagere emissie zien dan de inventarisatie en in Antwerpen en Terneuzen een hogere emissie dan de emissies (kt/ jr) uit de inventarisatie. Doordat de verschillen binnen de onzekerheidsmarge liggen kan niet direct gesproken worden van een verhoogd of verlaagd totaal. De belangrijkste reden voor de onder- (en over) schatting lijken de variaties binnen het huidige TROPOMI-satellietproduct te zijn.

ESA en zijn partners werken voortdurend aan de verdere ontwikkeling en verbetering van de dataproducten van TROPOMI.

De verwachting is dat binnen afzienbare tijd (voor eind 2021) verbeteringen van het TROPOMI-product beschikbaar komen vanwege een verbeterde bewerking van meetgegevens van de satelliet. Hiermee worden de emissieberekeningen ook nauwkeuriger (op basis van recent gepresenteerde resultaten wordt een verbetering van de nauwkeurigheid van rond de 20 % verwacht).

De ruimtelijke resolutie in de afgeleide emissies is op dit moment vooral beperkt door de resolutie van het satellietinstrument. Op de korte termijn kan een hogere resolutie worden bereikt met bijvoorbeeld vliegtuigmetingen (gebruikmakend van een vergelijkbaar instrument zoals TROPOMI, maar dan op een vliegtuig platform. Zulke metingen kunnen het aandeel van individuele bronnen beter in kaart brengen.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
1 Inleiding	7
2 Achtergrond en doel	8
2.1 NO ₂ gezien vanuit de ruimte met TROPOMI.....	9
2.2 Doel.....	10
3 Aanpak	11
3.1 Gebiedskeuze.....	11
3.2 Datasets.....	13
3.3 Emissieschatting.....	17
4 Resultaten	23
4.1 Emissieschattingen op basis van de pluim methode.....	23
4.2 Emissieschattingen op basis van de divergentie methode.....	25
5 Discussie en Conclusies	30
6 Referenties	32
7 Annex	34
7.1 Definitie Ruhrgebied.....	34
8 Ondertekening	35

1 Inleiding

Nederland staat voor een uitdaging om nieuw beleid te ontwikkelen om versneld de emissie van stikstofoxiden en ammoniak terug te dringen om schadelijke stikstofdepositie op natuurgebieden tegen te gaan.

Belangrijke bronnen van stikstof in de Provincie Zuid-Holland zijn o.a. de emissies van stikstofoxiden ($\text{NO}_x = \text{NO}_2 + \text{NO}$) uit verkeer, scheepvaart, en industriële activiteiten in het gebied Rotterdam-Rijnmond en ammoniak (NH_3) emissies van landbouwactiviteiten in de provincie.

Bij het uitwerken van een stikstofaanpak, kwam bij de Provincie Zuid-Holland de vraag naar voren wat hierbij een evenwichtige aanpak is. Hierbij spelen een aantal vragen een rol: welke reductie zou nodig zijn om de overbelasting van stikstof op de natuur volledig op te heffen? (O.a. de impact op NATURA-2000 gebieden zoals de Nieuwkoopse plassen, Meyendel en Voornes Duin), welke reductiedoelen zouden voor specifieke sectoren in Zuid-Holland gevraagd kunnen worden en in hoeverre deze doelen realistisch zijn?

De Provincie Zuid-Holland heeft TNO, als onafhankelijke expertisehouder en kennisorganisatie voor een specifieke onderzoeksvraag advies gevraagd:

- Is het mogelijk de relatieve prestatie van de industrie op het Rotterdamse Haven- en Industrieel bedrijventerrein, in termen van NO_x -uitstoot af te schatten met behulp van satellietdata, in verhouding tot andere grootschalige haven en/of industriële complexen in West-Europa?

2 Achtergrond en doel

Stikstofdepositie

Stikstof is een element dat veelvuldig voorkomt. De lucht die wij inademen bestaat bijvoorbeeld voor het overgrote deel uit stikstof in zijn pure, niet-reactieve en schadeloze vorm (N_2). Een klein deel van de stikstof op aarde en in onze lucht is beschikbaar in de vorm van reactief stikstof. Dit zijn chemische verbindingen die stikstof bevatten, welke onmisbaar zijn als voedingsstof voor de natuur. In overmaat kan deze reactieve stikstof een schadelijke werking hebben. De belangrijkste reactieve stikstofverbindingen die de mens via emissies in de atmosfeer brengt zijn ammoniak (NH_3) en stikstofoxiden (NO_x) (de som van stikstofmonoxide (NO) en stikstofdioxide (NO_2), waarbij de ratio van NO_x naar NO en NO_2 afhangt van meerdere factoren zoals de ozonconcentratie en temperatuur). Deze emissies veroorzaken een verslechtering van de luchtkwaliteit voordat ze elders neerslaan.

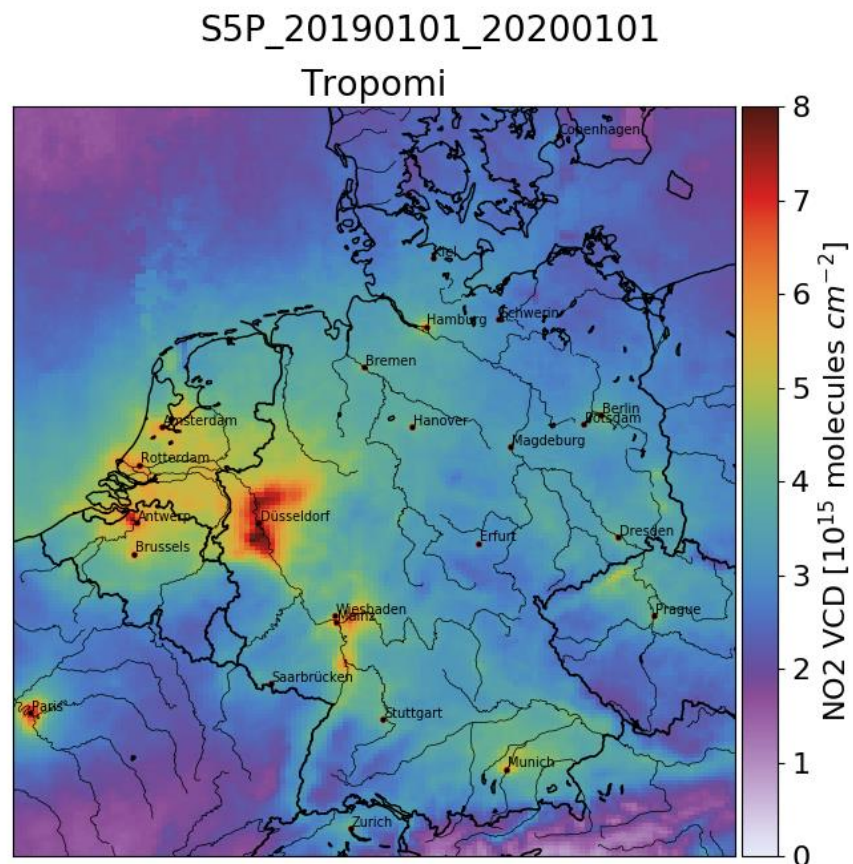
Wanneer een stof vanuit de lucht neerslaat spreken we van depositie. Stikstofdepositie, ook wel vermestende depositie genoemd, betreft de hoeveelheid stikstofhoudende verbindingen die door directe opname in de vegetatie en de bodem (droge depositie) of door neerslag (natte depositie) uit de atmosfeer verwijderd wordt. Niet alle NH_3 , en maar een fractie van de NO_x , slaat neer in de omgeving waar deze worden uitgestoten. Een aanzienlijk deel reageert in de lucht tot stikstofhoudende fijnstofdeeltjes die door de wind honderden kilometers getransporteerd kunnen worden voordat ze elders in het land, op zee of in het buitenland neerslaan.

Stikstofdepositie kan een groot probleem zijn voor natuurbeheer wanneer deze een te hoge bodemverzuring en vermesting tot gevolg heeft. In natuurlijke vegetaties en ecosystemen veroorzaakt een overaanbod aan nutriënten (vermesting) een ongewenste verandering in de vegetatie. Stikstof minnende soorten kunnen sneller profiteren van dit extra aanbod waardoor slechts enkele soorten alle plaats innemen, ten koste van andere, dikwijls zeldzamere, soorten. Een voorbeeld is de vergrassing van heidegebieden op de Veluwe. Te veel stikstof heeft dus een negatief effect op de biodiversiteit. In Nederland wordt de kritische depositiewaarde voor stikstof op 72% van de landnatuur overschreden. De kritische depositiewaarde is de grens waarboven het risico bestaat dat de kwaliteit van het habitat significant wordt aangetast door de verzurende en/of vermestende invloed van atmosferische stikstofdepositie. Bijna de helft van de natuurgebieden met een overschrijding krijgt jaarlijks meer dan 10 kg stikstof per hectare (kg N/ha) natuur meer dan de kritische waarde, wat vaak een overschrijding met een factor 2-3 betekent.

Om de depositie van stikstof te verminderen is het noodzakelijk om de stikstofuitstoot te verminderen. Een eerste voorwaarde hierbij is om vast te stellen hoeveel de uitstoot van de verschillende sectoren is en te begrijpen hoeveel deze bijdragen aan de depositie op relevant natuurgebieden zoals de Nieuwkoopse plassen, Meyendel en Voornes Duin. In deze studie verkennen we het gebruik van satellietdata om onafhankelijke uitspraken te doen over de emissiesterkte van het Rotterdam-Rijnmond gebied in vergelijking met andere vergelijkbare gebieden in Europa.

2.1 NO₂ gezien vanuit de ruimte met TROPOMI

Satellietinstrumenten bieden de mogelijkheid om dagelijks over een groot gebied onafhankelijke metingen te doen van de samenstelling van de atmosfeer. Dit maakt de satellietinstrumenten bijzonder geschikt voor het monitoren van reactieve stikstofcomponenten zoals NO₂, omdat de ruimtelijke verspreiding van deze component erg sterk kan variëren in relatie tot de afstand tot de bron van de emissies van NO_x en het weer. Deze metingen kunnen daarmee helpen om de onzekerheden in onze kennis over de emissies, transport en de depositie van stikstofoxiden te verminderen. In deze studie maken we gebruik van metingen van het TROPOMI-instrument dat onderdeel uitmaakt van de Copernicus Sentinel-5p missie van de Europese ruimtevaartorganisatie (ESA).



Figuur 1 Jaargemiddelde kolom concentratie van NO₂ [in moleculen per cm^2] gemeten met TROPOMI tussen 2019-01-01 en 2020-01-01.

Figuur 1 geeft een gemiddeld beeld van NO₂ metingen gemaakt met het TROPOMI-satellietinstrument. Dit instrument, mede ontwikkeld door TNO, meet de totale concentratie (moleculen/ cm^2) van verschillende stoffen (o.a. NO₂ en methaan) in een verticale kolom in de atmosfeer. Voor NO₂-metingen heeft deze kolom een nominale afmeting van 7×7 km² (metingen sinds 6 August 2019, 5×3.5 km²) aan het aardoppervlak (grondpixel).

TROPOMI meet tegelijkertijd een gebied van 2600 km breed en wordt beschouwd als het meeste nauwkeurige aardobservatie instrument voor NO₂ metingen. TROPOMI meet dagelijks over de gehele wereld, en passeert elke dag rond 12:30/13:30 Noordwest-Europa.

Wanneer, zoals in Figuur 1, de metingen van TROPOMI op een kaart geprojecteerd worden dan worden hotspots zichtbaar waar de vervuiling door NO₂ in de atmosfeer hoog is (rode gebieden). Satellietinstrumenten als TROPOMI kunnen gebruikt worden om de emissiesterkte van bronnengebieden te kwantificeren. Hiervoor wordt met behulp van een model de concentratie van NO₂ die in de lucht gemeten wordt teruggerekend tot een emissiewaarde.

Voorwaarde voor het bepalen van emissiesterktes met satellietdata is dat de emissiesterkte groot genoeg is om vanuit een satelliet te observeren, wat afhankelijk is van de kwaliteit en resolutie van het instrument. Hierbij geldt ook dat het alleen mogelijk is om de emissiesterkte van een individuele vervuiler te meten als die zorgt voor een sterke verhoging van NO₂ concentraties ten opzichte van het achtergrondniveau; in veel hotspots bevinden zich een veelheid aan bronnen die gezamenlijk voor een verhoging van de NO₂ concentratie zorgen en zal een individuele bron niet te onderscheiden zijn. Dit maakt het echter wel mogelijk om de emissie-intensiteit van een gebied, zoals Rotterdam Rijnmond, te bemeten en een vergelijking te maken met andere gebieden. Hierdoor wordt een beeld verkregen van de relatieve emissie-intensiteit (uitgedrukt in ton NO₂ per km² per jaar) van gebieden ten opzichte van elkaar en kan de informatie uit de emissie-registratie tot op zekere hoogte geverifieerd worden.

2.2 Doel

Het doel van deze studie is om te onderzoeken of het mogelijk is om een vergelijking te maken tussen de relatieve emissie-intensiteit van het gebied Rotterdam-Rijnmond en die van andere grote industriegebieden in Nederland, België en Duitsland op basis van TROPOMI-NO₂ satellietdata.

3 Aanpak

3.1 Gebiedskeuze

Om tot een goede keuze te komen voor gebieden waarmee het Rijnmondgebied kan worden vergeleken m.b.t. emissies van NO₂ met andere gebieden in Europa was een aantal criteria nodig om de vergelijkbaarheid te waarborgen. De keuze werd bepaald door de beschikbaarheid van satellietwaarnemingen en emissie-inventarisaties. De gegevens van de TROPOMI-satelliet zijn beschikbaar vanaf het voorjaar van 2018. Emissiegegevens zijn voor 2018 beschikbaar of goed afleidbaar uit die van 2017. Emissies van geïsoleerde, grote individuele bronnen zijn makkelijker te “zien” en af te schatten m.b.v. TROPOMI dan een grote groep van kleinere overlappende bronnen, die waarschijnlijk alleen als totaal gemeten kunnen worden. Met name grote energiecentrales domineren in concentratieverdelingen.

Op basis van het bovenstaande zijn de volgende gebieden voor de vergelijking van Rotterdam-Rijnmond met andere gebieden in Europa voorgesteld (zie Tabel 1 en Figuur 2). Het betreft elf te vergelijken gebieden en zes puntbronnen ter ondersteuning. Tien doelregio's zijn in wit weergegeven. Het Ruhrgebied en drie grote individuele puntbronnen binnen het Ruhrgebied zijn weergegeven in (donker)grijs. Drie grote afgelegen puntbronnen zijn weergegeven in het groen. Naast de locatie en naam van het gebied zijn de te verwachten emissietypes aangegeven, inclusief een korte omschrijving van het gebied plus een eerste inschatting van de haalbaarheid van een accurate emissieschatting ten opzichte van de criteria vanuit het perspectief van TROPOMI.

Allereerst is de keuze gemaakt voor de grote havengebieden van Noordwest-Europa: Antwerpen en Hamburg. Deze twee brongebieden zijn allebei duidelijk zichtbaar in de TROPOMI concentratiekaarten en bevatten naast havenemissies ook een aantal andere grote bronnen (industrie/ steden). Een aantal andere havens vallen ook binnen deze overweging, waaronder de Westpoort, Eemshaven en Terneuzen. Voor deze gebieden zullen de emissieschattingen minder precies zijn door grote bronnen in de nabijheid of de relatief gelimiteerde emissies binnen de gebieden zelf. Hetzelfde geldt voor het industriegebied Chemelot, dat omgeven is door andere grote emitters, wat uitdagend is voor de emissieschatting. Qua grootte van de in-situ gemeten emitters is het gebied rond TATA inclusief de nabije energiecentrale geselecteerd. Als laatste is het Ruhrgebied gekozen vanwege de oppervlakte, grootte en vele bronnen. Door de grootte van het gebied kon deze als grootste uitdaging gezien worden.

Ter ondersteuning van de relatieve emissiebepaling van de hierboven genoemde gebieden worden ook enkele puntbronnen in het onderzoek betrokken. Het betreft o.a. de twee geïsoleerd gelegen energiecentrales van Vattenfell-Peitz en Boxberg in Duitsland. Daarnaast zijn twee grote puntbronnen die opvallen binnen het Ruhrgebied in de analyse meegenomen: de energiecentrales in Niederausem en Neurath. Emissies uit deze beide bronnen zijn ongeveer een orde groter dan de emissies in de nabije omgeving, en zouden dus makkelijker af te schatten moeten zijn, en zijn een goede test voor de methodes onder meer ideale omstandigheden.

Tabel 1 Overzicht van de gebiedskeuzes

Naam	Emissietypes	Omschrijving	Criteria	Lat, Long	Oppervlakte ^f
Rotterdam-Rijnmond	Haven, Industrie, Chemische industrie, Energie	Regio van interesse, Haven	+	51.89,4.36	~314/550km ²
Maasvlakte*	Haven	Regio van interesse, Haven	-	51.94,4.07	~314/550km ²
Westpoort	Haven, City overlap	Haven, Stadsmissies nabij	-	52.41,4.82	~314/550km ²
TATA	Industrie, Energie, Chemische industrie	Grote industriële regio binnen Nederland	+++	52.47,4.63	~314/550km ²
Eemshaven	Haven, Energie	Haven, kleine bron	-	53.44,6.86	~314/550km ²
Chemelot	Chemische industrie, Industrie, Energie	Grote industriële regio binnen Nederland, overlap met omliggende bronnen	-	50.98,5.79	~314/550km ²
Terneuzen	Haven, Fabrieken	Haven, Stadsmissies vlakbij, overlap met omliggende bronnen	-	51.31,3.84	~314/550km ²
Antwerpen	Haven	Haven, Stads emissies	+	51.27,4.33	~314/550km ²
Gent	Haven	Haven, Stads emissies	+	51.08,3.74	~314/550km ²
Hamburg	Haven	Haven	+	51.89,4.36	~314/550km ²
Ruhrgebied	Mix van activiteiten	Mix van industrie, steden, hot-spot van de EU	-	Voor definitie zie sectie 7.1**	~10000km ²
Niederausem	Energieproductie, industrie	Sterke bron, testgebied voor overlap met omliggende regio,	+	50.99,6.67	~314/550km ²
Neurath	Energieproductie, industrie, Mijnen	Sterke bron, testgebied voor overlap met omliggende regio	+	51.04,6.63	~314/550km ²
Weisweiler	Energieproductie, industrie, Mijnen	Sterke bron, testgebied voor overlap met omliggende regio	+	50.84,6.32	~314/550km ²
Jänschwalde	Energieproductie	Sterke bron	+++	51.84,14.46	~314/550km ²
Boxberg	Energieproductie	Sterke bron	+++	51.42,14.57	~314/550km ²
Schwarze Pumpe	Energieproductie	Sterke bron	+++	51.54,14.35	~314/550km ²

Weging van de criteria vanuit perspectief TROPOMI

+++ : Optimale keuze; sterke bron, geïsoleerde ligging

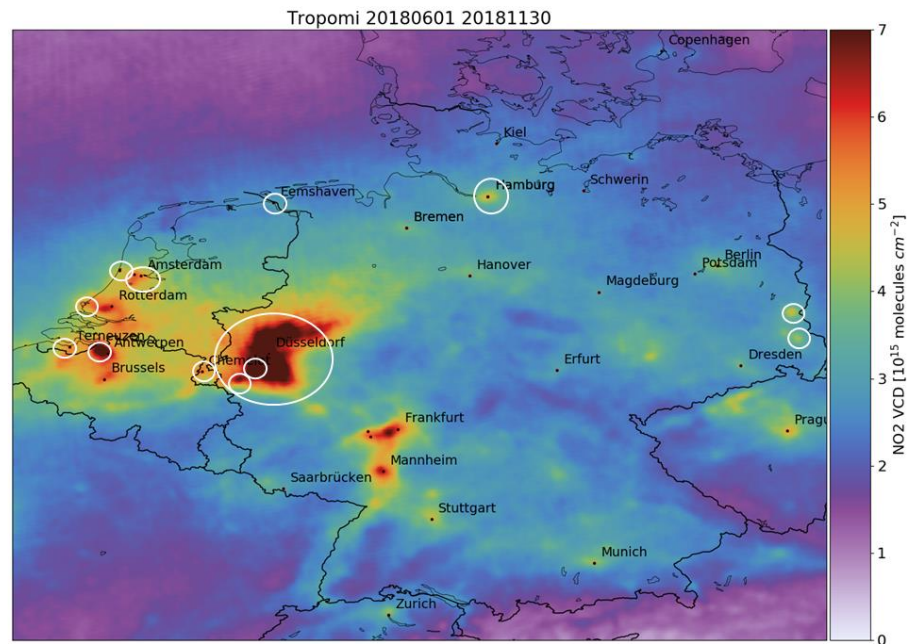
+ : Goede keuze vanwege grootte bron en/of ligging

- : Minder goed keuze vanwege ligging en of zwakke bron

* : Maasvlakte apart meegenomen voor bepaling emissies met de pluim methode.

** : Het Ruhrgebied heeft een totaaloppervlakte van ~10000 km².

^f : Voor de pluim methode wordt een oppervlakte van ~ km² gebruikt en voor de divergentie methode ~550 km².



Figuur 2 TROPOMI NO₂ gemiddelde kolom concentraties 20180601-20181130.

3.2 Datasets

3.2.1 TROPOMI-NO₂

De gebruikte TROPOMI-NO₂ troposferische kolom data is het S-5P/TROPOMI L2 reprocessed product (RPRO, <http://www.TROPOMI.eu/data-products/level-2-products>) welke vrij te downloaden zijn via de data hub (<https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

Alleen metingen uitgevoerd tussen 2018-05-01 en 2019-05-01 zijn gebruikt. Voor deze periode zijn de reprocessed data beschikbaar, welke de hoogste kwaliteit hebben van de verkrijgbare producten. Daarnaast is de data gefilterd op metingen met een kwaliteitswaarde van minstens 75% en maximaal 30% bewolking binnen een pixel. Door middel van deze filters wordt de kwaliteit van de pixels gewaarborgd en de onzekerheid in de metingen verkleind.

Het TROPOMI-NO₂ product wordt regelmatig gevalideerd met behulp van MAX-DOAS en PANDORA metingen. Binnen Europa staan er 5 max-DOAS stations, en 6 PANDORA locaties, ook al zijn er meer locaties waarvan de metingen niet automatisch worden gedeeld. Het totaal aantal sites is dus gelimiteerd. De vergelijkingen zijn openbaar en te vinden onder; [NO₂ validations - S5P Validation Service \(TROPOMI.eu\)](#).

Resultaten worden samengevat in quarterly validation reports met de meest recente Quarterly Validation Report te vinden onder [S5P-MPC-IASB-ROCVR-09.01.00-20201221.pdf \(TROPOMI.eu\)](#) en de recente publicatie van (Verhoelst et al., 2021).

De mediaan in het verschil tussen satelliet- en validatie-meting, (ook wel bias genoemd), is rond de -36% voor alle stations, wat oploopt tot -50% voor sommige industriële gebieden. In brongebieden is de totale NO₂-kolom afgeleid van de satelliet dus lager dan de validatiemetingen. De bias op de Nederlandse stations op Cabauw (-35%) en in De Bilt (bijna -50%) liggen ook in die range. De gerapporteerde random component van de onzekerheid in de meting is rond de 3.5×10^{15} moleculen cm⁻² voor metingen van kolom concentraties tussen 3×10^{15} – 15×10^{15} moleculen cm⁻² wat voor een groot deel van ons studiegebied van toepassing is. Voor extreem hoge concentraties boven de 15×10^{15} moleculen cm⁻² loopt dit op tot het dubbele. Wanneer we van een gemiddelde concentratie uitgaan van 9×10^{15} moleculen cm⁻² geeft dat een onzekerheidspercentage van rond de 35%.

Een deel van deze systematische afwijking komt door aannames tijdens de omzetting (retrieval) van de satelliet spectra naar NO₂ concentraties. Een van deze aannames betreft de verticale verdeling van NO₂, die gebruikt wordt om de *dichtheid/scattering* van/in de atmosfeer voor licht te berekenen (Air Mass Factor, AMF), die zeer variabel kan zijn rond grote bronnen. Doordat de TROPOMI metingen globaal gedaan worden is er een limitatie op de resolutie van het model dat gebruikt kan worden om deze verticale verdeling in te schatten. Echter, met behulp van hogere resolutie modellen is het mogelijk om verbeterde profielen uit te rekenen voor specifieke gebieden en die te gebruiken om de satellietdata te corrigeren. Beirle et al., (2019) rapporteert een correctie van bijna een factor twee voor het Duitse domein. Helaas gaf de studie geen spatiale verdeling voor de correctie en daarom missen we een schatting voor het Nederlandse domein. Met behulp van een hoge resolutie (0.10°x0.05°, Long x Lat) LOTOS-EUROS modelrun (<https://lotos-euros.tno.nl/>), (Manders et al., 2017) over dezelfde periode is dit alsnog berekend (gebruikmakend van de methode van McLinden et al., 2014). Tabel 2 geeft een overzicht van de factor waarmee moet worden vermenigvuldigd om te corrigeren voor de grove afschatting van de verticale verdeling in het originele product. Om er rekening mee te houden dat niet alle onzekerheid door de AMF komt en dus niet met de correctie wordt weggenomen, nemen we een overgebleven systematische onzekerheid van 20% aan en een random onzekerheidsterm van 35%.

Tabel 2 AMF-correctie factoren gebaseerd op hoge resolutie LOTOS-EUROS model runs en de studie van Beirle et al., 2019.

Naam	AMF factor	Bron
Rotterdam-Rijnmond	1.18	LOTOS-EUROS
Maasvlakte*	1.28	LOTOS-EUROS
Westpoort	1.22	LOTOS-EUROS
TATA	1.25	LOTOS-EUROS
Eemshaven	1.35	LOTOS-EUROS
Chemelot	1.20	LOTOS-EUROS
Terneuzen	1.25	LOTOS-EUROS
Antwerpen	1.30	LOTOS-EUROS
Gent	1.22	LOTOS-EUROS

Hamburg	1.00	LOTOS-EUROS
Neurath/Niederausem	1.98	Beirle et al., 2019
Weisweiler	1.98	Beirle et al., 2019
Jänschwalde	1.98	Beirle et al., 2019
Boxberg	1.98	Beirle et al., 2019
Schwarze Pumpe	1.98	Beirle et al., 2019
Ruhrgebiet	1.16	Beirle et al., 2019

3.2.2 *Emissiedatabase*

In deze studie werd gebruik gemaakt van een emissiekaart die is samengesteld uit de emissies voor Nederland, Duitsland en Europa. In de Europese kaart zijn de Nederlandse emissiekaarten voor 2018 van de Emissieregistratie gebruikt. Voor Duitsland zijn emissieverdelingen voor het jaar 2015 (Rapportage jaar 2019) van het Umweltbundesamt (UBA) gebruikt. Deze worden bij UBA ruimtelijk verdeeld met het GRETA-systeem (Gridding Emission Tool for ArcGIS (GrETA) (Schneider et al., 2016)). Hierdoor gebruiken we voor Nederland en Duitsland de best bekende gegevens over de emissieverdeling. De Europese emissiekaart, welke voor de overige landen in het domein is, is betrokken vanuit CAMS v4.1 (Kuenen et al., 2014).

Voor al deze emissie-inventarisaties geldt dat de emissies van grote puntbronnen expliciet zijn opgenomen (volgens de E-PRTR, European Pollutant Release and Transfer Register (E-PRTR)). Per sector worden de emissies van de puntbronnen van het landelijke totaal afgetrokken en de overige emissies (ook wel bijschatting genoemd) in de betreffende sector worden dan verdeeld via proxy-kaarten. Dat laatste is ook de standaard voor de verdeling van diffuse emissies vanuit sectoren als verkeer en landbouw. Voor verkeer wordt bijvoorbeeld gewerkt met de verkeersintensiteiten op het hoofdwegenet aangevuld met een deel urbaan verkeer verdeeld a.d.h.v. populatie kaart.

De meest recent versie van de E-PRTR is de rapportage van 2020 (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/industrial-reporting-under-the-industrial-2>) met de emissie-totalen voor de jaren 2017 en 2018. De dataset van 2018 is niet helemaal compleet daarom maken we in de vergelijkingen gebruik van de set van 2017.

Tabel 3 geeft voor elk doelgebied een overzicht van de drie sectoren met de grootste fractie van de emissies binnen een radius van 10 km. Het emissietotaal van het Ruhrgebied is gebaseerd op alle emissies die binnen de definitie (voorbeeld te vinden in sectie 7.1) van het gebied liggen. De emissies en sectoren zijn overgenomen uit de gecombineerde inventarisatie (ER2018+GRETA+CAMS4.1). Een sector is vet gedrukt wanneer deze verantwoordelijk is voor meer dan 50% van het emissietotaal.

Tabel 3 Top 3 sectoren per regio voor NO₂. Alle emissies zijn gebaseerd op de ER2018+GRETA+CAMS4.1 databases. Emissiesectoren met meer dan 50% van de totaal emissies zijn vetgedrukt.

Naam	Totaal	Sector 1 [kt jaar ⁻¹]		Sector 2 [kt jaar ⁻¹]		Sector 3 [kt jaar ⁻¹]	
		Emissie	Sector	Emissie	Sector	Emissie	Sector
Rotterdam-Rijnmond	13.5	2.84	Raffinage	2.10	Int. Scheepv.	1.96	Energie
Maasvlakte	14.1	8.07	Int. Scheepv.	2.14	Energie	1.55	Raffinage
Westpoort	8.6	1.89	Int. Scheepv.	1.59	Energie	0.92	Per. verkeer
TATA	9.8	5.73	Staal prod.	1.17	Int. Scheepv.	0.92	Energie
Eemshaven	4.1	3.05	Energie	0.81	Int. Scheepv.	0.08	Mest Applicatie
Chemelot	4.7	2.41	Chem. Ind.	0.59	Pers. verkeer	0.43	Vrachtverkeer
Terneuzen	6.6	2.75	Chem. Ind.	2.20	Int. Scheepv.	0.64	Binnenvaart
Antwerpen	12.2	4.39	Chem. Ind.	3.50	Raffinage	1.11	Energie
Gent	7.8	3.23	Binnenvaart	1.60	Energie	0.88	Oil & Gas
Hamburg	10.5	4.33	Energie	1.58	Pers. verkeer	0.74	Raffinage
Neurath/Niederausem	45.3	39.66	Energie	2.11	Raffinage	1.78	Oil & Gas
Weisweiler	15.3	11.85	Energie	0.63	Pers. verkeer	0.61	Raffinage
Jänschwalde	19.0	16.88	Energie	0.89	Raffinage	0.76	Oil & Gas
Boxberg	13.7	12.27	Energie	0.65	Raffinage	0.55	Oil & Gas
Schwarze Pumpe	6.5	5.34	Energie	0.28	Raffinage	0.24	Oil & Gas
Ruhrgebied	197.6	79.50	Energie	30.41	Pers. verkeer	13.46*	Vrachtverkeer*

3.2.2.1 Temporele variatie van emissies

Emissies variëren zowel in de ruimte als in de tijd. De ruimtelijke verdeling is onderdeel van de emissiedatabase maar voor de tijdsvariatie op hoge temporele resolutie is meer gedetailleerde informatie nodig. Binnen het standaard luchtkwaliteit model van TNO, LOTOS-EUROS worden verschillende tijdsprofielen gebruikt welke afhankelijk zijn van de sector waarin de emissies plaats vinden. Er wordt bijvoorbeeld verschil gemaakt tussen de tijdsvariatie van emissies door verkeer en die van emissies van energiecentrales, industrie en huishoudens. Doordat het lokale tijdstip van meten van TROPOMI rond het middaguur ligt, en NO₂ een vrij korte levensduur (meerdere uren) heeft in de atmosfeer, is de geobserveerde NO₂ grotendeels afkomstig van emissies in de voorgaande uren. Hierdoor zal een emissieschatting gebaseerd op metingen op dat tijdstip relatief meer informatie bevatten over de bronnen die met name overdag in de ochtenduren emitteren. Omdat andere bronnen een continu karakter hebben moet hiervoor gecorrigeerd worden door de tijdsprofielen van de verschillende sectoren in acht te nemen. Deze correctie is per regio uitgerekend aangezien de verschillende sectoren in de verschillende gebieden een ander aandeel in het totaal hebben. De berekening van deze correctie is gebaseerd op een simpel box model waarin elk uur de emissie wordt logelaten waarna het verval ten opzichte van een levensduur wordt toegepast. Voor de levensduur nemen we de 4 uur aan zoals toegelicht in sectie 3.3.1.

Door dit voor elk uur te halen binnen een jaar kan steady state dagelijkse gang worden afgeleid.

De typische overpass van TROPOMI, over het hele domein, vindt plaats rond 12 uur, en voor dat tijdstip vinden we een factor van voor alle regio's gemiddeld 1.23. Dit betekent dat de te verwachten emissies afgeleid van de TROPOMI metingen gemiddeld 23% boven het daggemiddelde zullen liggen.

Naast een correctie voor de dagelijkse gang in de emissies moet ook een (geringe) correctie worden gemaakt voor de variaties door het jaar. Er zijn van TROPOMI meer metingen in de zomer dan in de winter doordat er meer wolkenvrije dagen zijn in de zomer. Hierdoor wordt een composietkaart zoals in Figuur 1 weergegeven gedomineerd door metingen in de zomer. Om hiermee rekening te houden berekenen we het aantal observaties per maand en vermenigvuldigen dit met de deelsom van de jaarlijkse emissies per maand. Dit normaliseren we vervolgens ten opzichte van alle observaties binnen het jaar om zo tot een correctiefactor te komen. De benodigde correctie is gemiddeld 0.98 voor alle regio's, en emissies zijn dus gemiddeld circa 2% te laag en dus van minder belang dan de invloed van de dagelijkse gang in de emissies. Beide factoren samen geven een totale correctiefactor 1.20.

3.2.2.2 *NO₂ aandeel in NO_x*

Aangezien TROPOMI alleen NO₂ meet is er een factor nodig om tot een NO_x totaal te komen. De verdeling van NO_x naar NO en NO₂ hangt af van meerdere factoren zoals de ozonconcentratie en temperatuur. Binnen deze studie wordt een ratio van NO_x/NO₂ van 1.32 aangenomen gebaseerd op de aannames en vindingen binnen de studies van (Beirle et al., 2019) en (Seinfeld, 1989). De bijbehorende onzekerheid is rond de 20% binnen noordwest Europa.

3.2.3 *Meteorologie*

Voor de weersgegevens zijn de meteorologische velden van ECMWF-ERA5 gebruikt. Het overgrote deel van een emissiepluim zit typisch in de eerste 1000 m boven het oppervlak en daarom wordt voor de effectieve windsnelheid het gemiddelde van de lagen tot 1 km hoogte aangenomen. In de literatuur worden typisch windsnelheden gebruikt van of ~500 m (Beirle et al., 2019) boven het oppervlak of een gemiddelde van de eerste 1000 m (Dammers et al., 2019). De onzekerheid in de resulterende windsnelheid ligt typisch rond de 1 à 2 m/s, wat resulteert in een emissie-onzekerheid van 10-30% afhankelijk van de methode voor het bepalen van de emissie en de situatie (Beirle et al., 2019; Dammers et al., 2019).

3.3 **Emissieschatting**

Binnen dit onderzoek zijn er twee verschillende methodes gebruikt om tot een de inverse modellering van satellietwaarnemingen te komen. De eerste methode wordt veelal gebruikt voor geïsoleerde puntbronnen zoals steden en energiecentrales, en betreft de Exponential Modified Gaussian Plume (EMG) methode, welke in verschillende studies is toegepast voor meerdere doeleinden (Dammers et al., 2019; Fioletov et al., 2020, 2011; McLinden et al., 2016). De tweede methode is meer experimenteel en kan gebruikt worden voor grotere gebieden waar meerdere steden en industrie dicht bij elkaar liggen, de divergentie methode (Beirle et al., 2019).

Voor deze inverse modellering zijn drie criteria van belang:

- Beschikbare resolutie van de TROPOMI data;

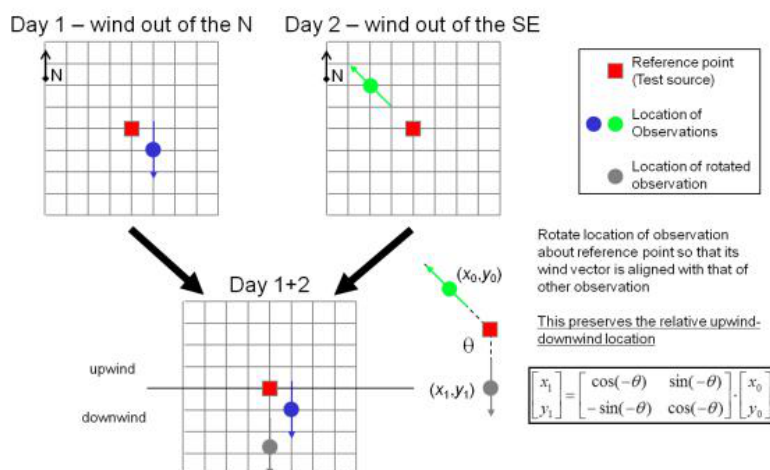
- Beschikbare meetgegevens van grote bronnen (accuraatheid bepalen);
- Actualiteit van de emissies van de onderzochte bronnen (i.v.m. tijdconstante emissie).

De satelliet-pixelgrootte van 7x7 km² kan gezien worden als een limiet op de resolutie voor een accurate schatting van de emissie-intensiteit. Door gebruik te maken van de kleine dagelijkse verschuivingen in TROPOMI's pixels (doordat de satelliet elke dag op een net andere tijd en plaats meet) kan dit in een zekere mate worden verbeterd afhankelijk van het aantal metingen en de periode van metingen. Door een groot aantal observaties met variabele meetlocatie te gebruiken kan er door middeling op een hogere resolutie meer detail uit de satellietmetingen gehaald worden.

Grote individuele bronnen zijn makkelijker te zien en af te schatten dan vele kleinere overlappende bronnen, die waarschijnlijk alleen als totaal gemeten kunnen worden. Met name de geïsoleerde grote energiecentrales domineren naar verwachting de concentratie verdelingen rondom hun locatie. Door gebruik te maken van in situ metingen (metingen van emissies door de grootste emitters op geschikte locaties) kunnen we de ratio tussen de uit TROPOMI afgeleide en lokaal gemeten emissies vaststellen.

3.3.1 Gaussische Pluim methode

Door gebruik te maken van de dagelijkse variaties in de NO₂ kolom, de windrichting en de windsnelheid kunnen emissies van sterke puntbronnen worden afgeleid. De Gaussische pluimmethode (EMG, de Foy et al., 2014; Fioletov et al., 2011; McLinden et al., 2016) maakt een schatting van de emissiesterkte van een bron door eerst alle dagelijkse observaties te roteren zodanig dat ze dezelfde windrichting krijgen ten opzichte van een centraal punt, de emissiebron in kwestie.



Figuur 3 Voorbeeld van de rotatie van een observatie ten opzichte van een emissiebron met behulp van de windvelden. (McLinden et al., 2016, Supplemental figuur 1)

Door alle observaties op deze manier te draaien wordt een pluim zichtbaar, waar vervolgens een formule die de vorm van de pluim beschrijft op gefit kan worden.

Figuur 3 laat een voorbeeld zien van de rotatie waarin de vector met windrichtingen in noordelijk en oostelijke richting vermenigvuldigd worden met een rotatie matrix. Om de vorm van de pluim te beschrijven gebruiken we de formule zoals beschreven door Fioletov et al. (2011) en veelal gebruikt is in andere studies (o.a. Dammers et al., 2019 voor ammoniak en McLinden et al., 2016 voor zwaveldioxide);

$$VCD_{no2}(x, y, s) = a * f(x, y) * g(y, s) + B$$

Met;

$$f(x, y) = \frac{1}{\sigma_1 * \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_1^2}\right)$$

en;

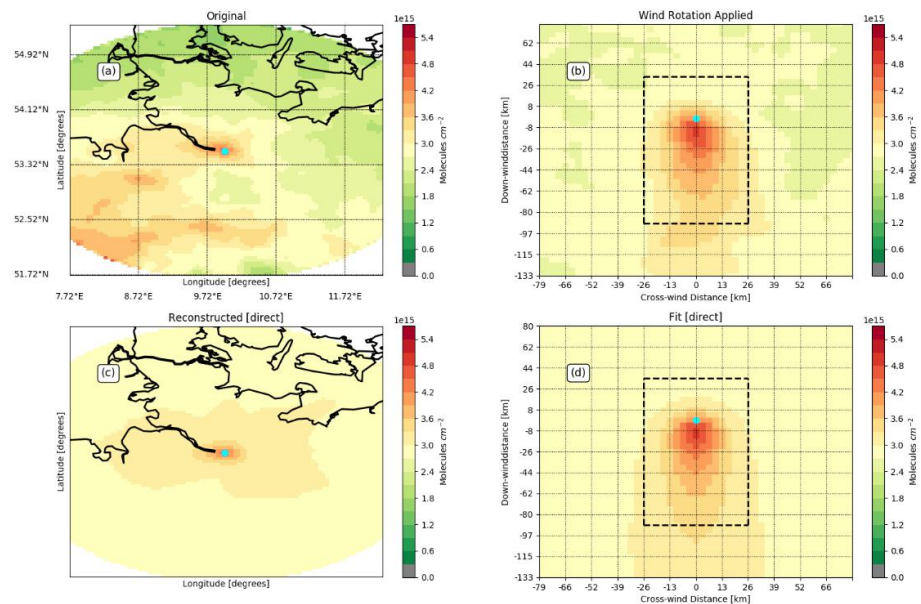
$$g(y, s) = \frac{\lambda_1}{2} \exp\left(\frac{\lambda_1(\lambda_1\sigma^2 + 2y)}{2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\lambda_1\sigma^2 + y}{\sqrt{2}\sigma}\right)$$

$$\sigma_1 = \begin{cases} \sqrt{\sigma^2 - 1.5y}, & y < 0 \\ \sigma & , y \geq 0 \end{cases}$$

$$\lambda_1 = \frac{\lambda}{s}$$

Waarin, x, y de locatie loodrecht en parallel op de pluim aangeeft, s de windsnelheid, B de achtergrondconcentratie, σ de breedte van de pluim, die een combinatie van de pixel van TROPOMI en diffusie is, λ de verliesnelheid aan chemie en depositie, met $\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \tau$, de levensduur in de atmosfeer, en erfc de Gauss errorfunctie. De twee functies samen beschrijven de advectie en diffusie binnen een pluim. In de fit van deze functie worden alleen de gemeten kolommen meegenomen in een gebied tussen 36 & 90 km tegen en met de windrichting, en ± 25 km loodrecht op de windrichting. Voor erg sterke geïsoleerde bronnen kan zowel de levensduur als de pluimbreedte worden afgeschat, maar omdat binnen de gekozen regio's veel andere bronnen aanwezig zijn worden hier een pluimbreedte van 7 km gehanteerd (gebaseerd op TROPOMI's footprint, en resultaten van een studie voor bronnen in Noord-Amerika, persoonlijke correspondentie met D. Griffin, Environment and Climate Change Canada), en een levensduur van 4 uur met een standaard deviatie van 1.3 uur, wat gezien kan worden als een typische aanname voor een industriële regio zoals noordwest Europa, (Beirle et al., 2019 & correspondentie met D. Griffin, ECCC).

Een voorbeeld van de procedure wordt gegeven in Figuur 4. Figuur 4a geeft het gemiddelde concentratieveld (moleculen/cm²) weer voor de regio rond Hamburg, Duitsland. Figuur 4b geeft de gemiddelde concentratie weer wanneer alle observaties met de windrichting worden gedraaid ten opzichte van Hamburg. Een pluim is duidelijk zichtbaar met de piek concentratie net onder het beginpunt en daarna een afname parallel aan de windrichting door het verval door chemie en depositie. Figuur 4c laat de gemiddelde concentratie zien berekend met behulp van de gefitte parameters van de pluimfunctie. Vervolgens geeft Figuur 4d de reconstructie weer voor het originele domein zoals in Figuur 4a.



Figuur 4 Voorbeeld windrotatie en fit van het NO_2 concentratieveld rondom Hamburg, Duitsland. De figuur linksboven geeft het gemiddelde veld weer voor de periode 20180501-20190501. De figuur rechtsboven de geroteerde concentratie. Rechts onder de fit van de pluimfunctie, en links onder een reconstructie van het concentratieveld gebaseerd op de berekende parameters.

Om de onzekerheid uit te rekenen voor elke locatie nemen we aan dat er een systematisch onzekerheid van 20% en random onzekerheid van 35% (sectie 3.2.1) in de TROPOMI data zit. Door de vele observaties die gebruikt kunnen worden voor elke locatie, gaan we ervan uit dat de random onzekerheid tot nul wordt verkleind. Voor de levensduur nemen we aan dat de onzekerheid systematisch is voor individuele bronnen, met een onzekerheid van 25% (gebaseerd op een fout van ± 1 uur op een totaal van 4 uur). Voor de meteoelden nemen we een fout van rond de 2m/s per seconde aan wat een gemiddelde afwijking van rond de 6% oplevert (2x de waarde zoals gegeven in, Dammers et al., 2019). Hierbij gaan we van een systematisch fout uit, doordat het doorgaans afhankelijk is van de topografie (Dammers et al., 2019). Voor de NO_x/NO_2 ratio nemen we een systematische onzekerheid van 20% aan (Beirle et al., 2019). Samengenomen geeft dit een systematische onzekerheid van 38%. Daarbij wordt de onzekerheid in de achtergrond concentratie fit opgeteld. TROPOMI heeft daarnaast ook een detectielimiet. Beirle et al., (2019) rapporteerde dat het onder niet perfecte condities het mogelijk is om bronnen waar te nemen met emissies van 0.11 kg/s wat omgerekend een detectielimiet geeft van 3.47 kt jaar. Afhankelijk van het aantal observaties en kwaliteit van de metingen is het mogelijk om dit getal verder te verkleinen, maar voor deze studie gaan we uit van een ondergrens van 3.47 kt jaar en tellen deze kwadratisch op bij de systematische onzekerheid.

In lekentermen vertaald bovenstaande zich (voor een bron van 20 kiloton NO_x), in een onzekerheid in de emissieschatting volgens de Gaussische Pluim methode van $\pm 42\%$. Dit houdt in dat we een emissie van 20 kiloton NO_x berekenen de werkelijke waarde met een waarschijnlijkheid van 95% zal liggen tussen 11.6 kton en 28.4 kton.

3.3.2 Divergentie methode

De divergentie methode is gebaseerd op de aanname dat de atmosfeer, gemiddeld over een langere tijd, als een steady state gezien kan worden. Met behulp van TROPOMI kan NO₂ op hoge resolutie bestudeerd worden, zoals beschreven in Beirle et al. (2019). De methode beschrijft het concentratie-veld als een steady state toestand van alle emissies en verliezen (zoals door depositie en chemische omzettingen).

De NO₂ velden (V) worden omgezet naar een flux (emissie) door gesamplede concentratie velden zoals gemeten op elke overpass te vermenigvuldigen met de windsnelheid in oostelijke en noordelijke richting (\vec{w}). In deze studie worden de TROPOMI observaties omgezet naar een 0.027 x 0.027 concentratie (moleculen/cm²) veld, wat correspondeert met een resolutie van rond de 3 km in noord-zuidelijke richting. Door de afgeleide te nemen van de flux velden kan de divergentie worden berekend, wat gezien kan worden als het netto budget van alle fluxen in en uit een gridcell (in y richting voor $F_v = V * v$ (windsnelheid noordelijke richting) en x richting voor $F_u = V * u$ (windsnelheid oostelijke richting)). Vervolgens berekenen we het verlies van NO₂ door een levensduur aan te nemen van 4+-1.3 uur en deze te vermenigvuldigen met het concentratie veld.

Samengevoegd geeft dit ons de emissies aangezien de flux uit de gridcell + het chemisch (en depositie) verlies van NO₂ in balans moet zijn met de emissies in de cel. De formule hiervoor is;

$$E = D + S = \nabla_r V \vec{w} + \frac{rV}{\tau}$$

Met E de emissie in NO_x, D de divergentie, S de verlies term, V het concentratieveld, \vec{w} het windveld, τ de levensduur en r de ratio tussen NO_x en NO₂, welke verder wordt behandeld in sectie 3.2.2.2. De TROPOMI satelliet in combinatie met deze methode heeft een detectie limiet van rond de 0.11 kg/s voor individuele bronnen (Beirle et al., 2019) wat gelijk staat aan 3.47 kt per jaar. De onzekerheid voor individuele punten hangt af van de onzekerheid in TROPOMI's observaties, de aanname voor de levensduur, de onzekerheid in de windvelden, en de aanname voor de NO_x:NO₂ ratio, en komt onder ideale omstandigheden uit op rond de 40%. De methode is ongevoelig voor bias in het satellietproduct zolang deze constant zijn over een groter domein. Regionale effecten op kleinere schaal kunnen voor patronen zorgen in het divergentie veld en hebben dus een effect op de emissieschatting. Door te sommeren over meerdere velden kunnen de random onzekerheden verkleind worden. Rond sterke puntbronnen domineert daarnaast de divergentieterm waardoor de onzekerheid in de levensduur van minder belang is.

Om de onzekerheid uit te rekenen voor elke individuele cel in het domein nemen we aan dat er een systematische onzekerheid van 20% en random onzekerheid van 35% in de TROPOMI data zit (zie sectie 3.2.1). Voor de levensduur nemen we aan dat de onzekerheid systematisch is voor individuele gebieden, met een onzekerheid van 25% (gebaseerd op een fout van +-1 uur op een totaal van 4 uur). Voor de meteovelden nemen we een fout van rond de 2 m/s per seconde aan wat een gemiddelde afwijking van rond de 30% oplevert.

Hierbij gaan we van een systematische fout uit, doordat het doorgaans afhankelijk is van de topografie (heuvels/bergen, Beirle et al., 2019; Dammers et al., 2019).

Voor de NO_x/NO_2 ratio nemen we een systematische onzekerheid van 20% aan (Beirle et al., 2019). Daarnaast tellen we ook hier de detectielimiet van $3.47 \text{ kt jaar}^{-1}$ op.

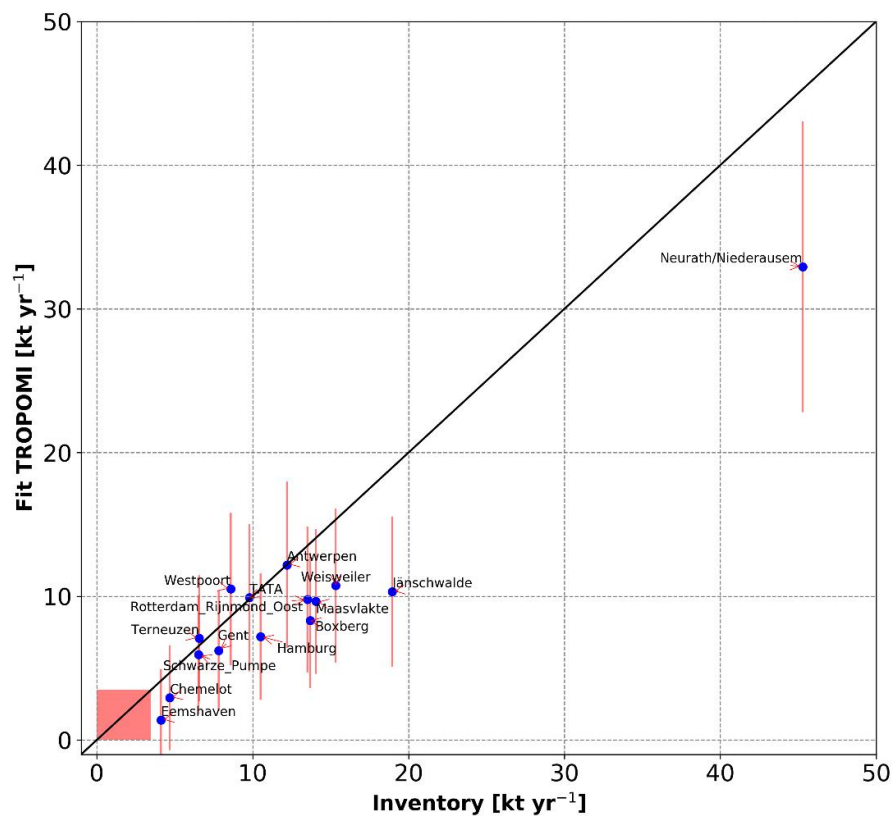
In lekentermen vertaald bovenstaande, voor een bron van 20 kiloton NO_x in een industrieel gebied met een regionaal verhoogde NO_x concentratie (bijvoorbeeld de regio Antwerpen, $>5 \times 10^{15}$ moleculen), zich in een onzekerheid in de emissieschatting volgens de divergentie methode van $\pm 37\%$. Dit houdt in dat we een emissie van 20 kiloton NO_x berekenen de werkelijke waarde met een waarschijnlijkheid van 95% zal liggen tussen 12.6 kton en 27.4 kton.

4 Resultaten

4.1 Emissieschattingen op basis van de pluim methode

In deze paragraaf wordt een vergelijking gemaakt tussen de gemeten emissie door TROPOMI (op basis van de pluim methode) en de waarden in de emissiedatabase. Om tot deze vergelijking te komen worden alle emissies in de emissiedatabase binnen een straal van tien kilometer opgeteld. Dit zorgt voor een eerlijke vergelijking met de TROPOMI schatting doordat TROPOMI's pixel voor een uitgesmeerd beeld zorgt. Met een optimale grondpixel van 3.5x5.5 km² geeft straal 10 km een realistisch beeld.

Tabel 4 en Figuur 5 geven een overzicht van de vergelijking tussen de in de emissiedatabase gerapporteerde emissies en de vanuit TROPOMI afgeleide emissies op basis van de pluim methode.



Figuur 5 Spreidingsdiagram van de met pluim methode geschatte emissies en de emissie-database.

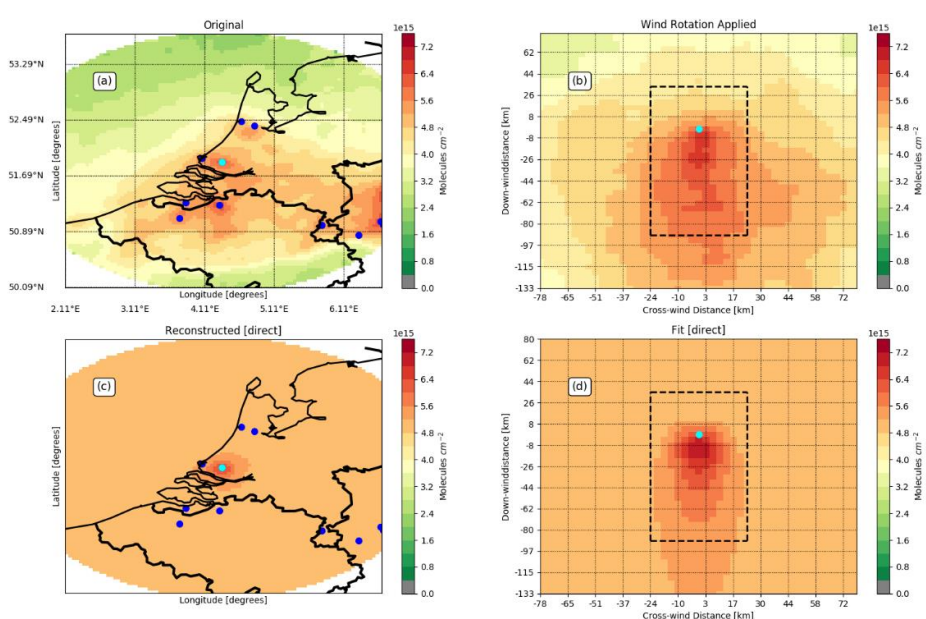
Tabel 4 Emissies geschat met de pluim methode. Emissie-inventarisatie is de som van alle emissies binnen een radius van 10 kilometer van de locatie. De emissie-totalen worden zowel weergegeven als de totaal emissies binnen de 10 km radius (grijs), als emissies per km² (wit). De tweede kolom geeft het totaal van alle grote puntbronnen die geregistreerd staan in de EPRTTR en de derde kolom de emissies zoals deze in de ER/GRETA/CAMS database zitten. De vierde kolom geeft de schatting van TROPOMI met daarbij de onzekerheid op het totaal.

Naam	Emissies inventarisatie EPRTTR		Emissies inventarisatie ER + GrETA + CAMS		TROPOMI pluim methode	
	Kt jaar ⁻¹	Ton km ⁻² jaar ⁻¹	Kt jaar ⁻¹	Ton km ⁻² jaar ⁻¹	Kt jaar ⁻¹	Ton km ⁻² jaar ⁻¹
Rotterdam-Rijnmond	5.6	17.9	13.5	43.0	10.0 ± 5.2	31.8±16.4
Maasvlakte*	4.6	14.6	14.1	44.7	9.8 ± 5.1	31.1±16.2
Westpoort	1.4	4.3	8.6	27.3	10.5± 5.3	33.4±16.8
TATA	6.8	21.8	9.8	31.2	9.9 ± 5.1	31.5±16.3
Eemshaven	2.8	9.1	4.1	13.1	1.4 ± 3.5	4.3±11.2
Chemelot	2.4	7.8	4.7	14.9	2.9 ± 3.6	9.2±11.6
Terneuzen	3.0	9.5	6.6	20.9	7.0 ± 4.4	22.2±13.9
Antwerpen	11.3	35.9	12.2	38.8	11.6 ± 5.6	36.9±17.9
Gent	1.7	5.5	7.8	24.9	6.1 ± 4.2	19.4±13.3
Hamburg	2.8	8.9	10.5	33.4	7.2 ± 4.4	22.9±14.1
Neurath/Niederausem	40.9	130.3	45.3	144.2	32.9±10.1	104.8±32.3
Weisweiler	13.6	43.3	15.3	48.8	10.7 ± 5.4	34.2±17.1
Jänschwalde	19.0	60.5	19.0	60.3	10.3 ± 5.2	32.8±16.7
Boxberg	13.5	43.0	13.7	43.6	8.3 ± 4.7	26.4±14.9
Schwarze Pumpe	6.1	19.4	6.5	20.8	5.9 ± 4.1	18.9±13.2

Over het algemeen is er een goede correlatie tussen de afgeleide emissies en de emissiedatabase, al is er sprake van een systematisch verschil. De emissies van Neurath/Niederausem zijn samengevoegd tot één emissie omdat de locaties binnen tien kilometer van elkaar staan en dus vanuit het oogpunt van de inventarisatie ook worden opgeteld. Vooral de grotere puntbronnen in Duitsland (Neurath/ Nieder-Ausem/Jänschwalde/Boxberg) geven ondanks de onzekerheid een duidelijk lagere vanuit TROPOMI afgeleide emissie dan de inventarisatie. Voor de doelregio's binnen Nederland en België vinden we over het algemeen een betere match.

Er zijn een aantal mogelijke redenen voor een onderschatting. De onderschatting van de NO₂ kolommen door TROPOMI is zoals eerder genoemd bekend. Deze is groter in gebieden met veel fijnstof en hoge NO₂ concentraties (Quarterly Validation Report, [S5P-MPC-IASB-ROCVR-09.01.00-20201221.pdf \(TROPOMI.eu\)](https://www.tropomi.eu/Validation/Reports/S5P-MPC-IASB-ROCVR-09.01.00-20201221.pdf)). De correctie met de AMF, zoals toegepast binnen deze studie (zie 3.2.1), lost het deel van de bias op dat door de ruimtelijke resolutie van de aannames komt, maar niet de invloed van fijnstof. Gebieden waar met regelmaat zeer hoge concentraties fijnstof voorkomen kunnen dus een overgebleven bias vertonen. Daarnaast kunnen variaties in het emissieveld rondom een bron zorgen voor een te hoge achtergrondconcentratie en dus een onderschatte emissie (bijvoorbeeld in het Ruhrgebied). De divergentiemethode is minder gevoelig voor zulke variaties in de achtergrond.

Locaties met lagere emissies zoals de Eemshaven en Chemelot liggen rond de detectielimiet van TROPOMI. Voor deze locaties vinden we over het algemeen een onderschatting doordat voor sommige dagen en het signaal van de bron ten opzichte van de achtergrondconcentraties te laag is om gedetecteerd te worden. Een andere mogelijkheid voor de te lage emissies is mogelijk dat de aangenomen levensduur te hoog is ingeschat. Dit is bijvoorbeeld mogelijk voor de afgelegen locaties, zoals de energiecentrales in Oost-Duitsland en Eemshaven. De emissiefit voor de Rotterdam-Rijnmond regio lijkt vooral te laag uit te komen door een te hoge fit van de achtergrond concentratie (Figuur 6), wat een indicatie is van een te grote invloed van omliggende bronnen. Hetzelfde is tot zekere hoogte ook waarschijnlijk voor Terneuzen en Gent waarvan de pluimen van beide bronnen overlap hebben voor situaties met wind uit het noordwesten en zuidoosten.



Figuur 6 Fit resultaten voor de Rotterdam-Rijnmond regio. De figuur linksboven geeft het gemiddelde veld weer voor de periode 20180501-20190501. De figuur rechtsboven de gerooteerde concentratie. Rechtsonder de fit van de pluimfunctie, en linksonder een reconstructie van het concentratieveld gebaseerd op de berekende parameters.

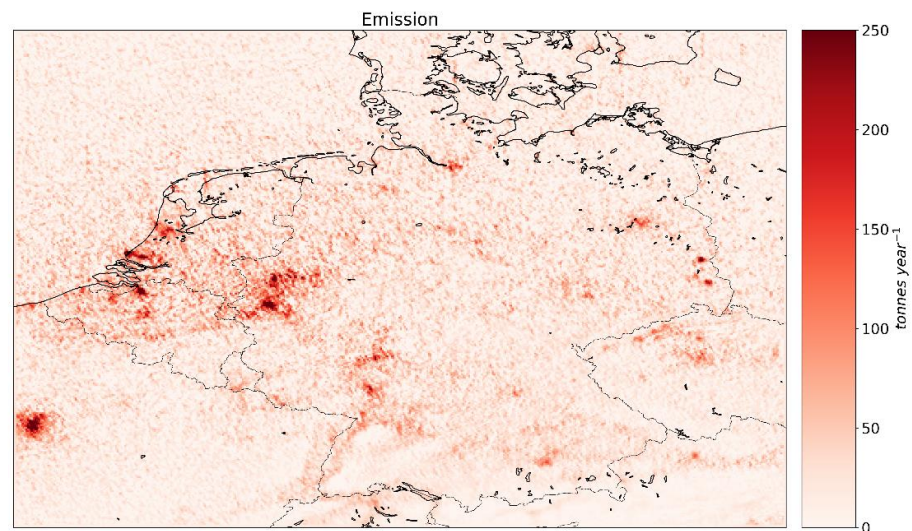
4.2 Emissieschattingen op basis van de divergentie methode

In deze paragraaf wordt de vergelijking gemaakt tussen de gemeten emissie door TROPOMI (op basis van de divergentie methode) en de waarden in de emissiedatabase. Doordat de divergentiemethode emissies geeft met een ruimtelijke verdeling ($3 \times 3 \text{ km}^2$) sommeren we hier over meerdere cellen in plaats van een radius. Dit zorgt net als met de pluim methode voor een eerlijke vergelijking met de TROPOMI schatting doordat TROPOMI's pixel voor een uitgesmeerd beeld zorgt.

Met een optimale grondpixel van $3.5 \times 5.5 \text{ km}^2$ geeft een radius van 10 km een realistisch beeld, wat overeenkomt met een vierkant van $20 \times 20 \text{ km}^2$ rondom de locatie (en in praktijk neerkomt op een veld van $\sim 23 \times 24 \text{ km}^2$).

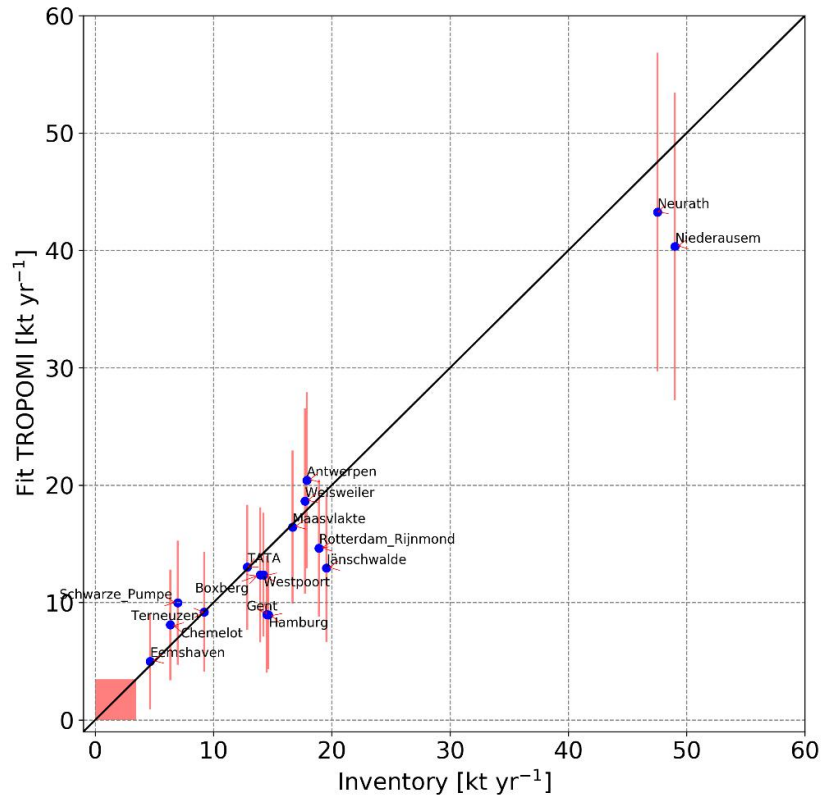
In Figuur 7 is een regionaal overzicht van de berekende emissies te zien. Zowel regio's met industrie als steden zijn goed te herkennen, zoals bijvoorbeeld Amsterdam, Rotterdam en de Maasvlakte. Sterke puntbronnen zoals de energiecentrales in Oost-Duitsland zijn zichtbaar als een licht uitgesmeerde vlek. Dit komt, zoals eerder aangegeven, doordat de pixel van TROPOMI voor een uitgesmeerd concentratieveld zorgt.

Door de emissie te sommeren over meerdere cellen ($20 \times 20 \text{ km}^2$ rondom de bron) kan het emissie-totaal van zulke bronnen berekend worden. De onzekerheid is berekend door de systematische fouten van de individuele cellen te sommeren terwijl de individuele random fouten kwadratisch wordt opgeteld waarna de wortel wordt genomen over de som. De kwadratische som van de gesommeerde systematische en random fouten geeft vervolgens de totale onzekerheid.



Figuur 7 Regionale emissie in ton per jaar (per 0.027×0.027 cell) met behulp van de divergentie methode.

Figuur 8 en Tabel 5 en geven de berekende emissietotalen weer voor elk van de locaties.



Figuur 8 Spreidingsdiagram van de met divergentiemethode geschatte emissies en de emissie-inventarisatie. Het ruhrgebied is weggelaten uit het spreidingsdiagram zodat de doelregio's beter zichtbaar zijn.

De divergentiemethode laat een betere overeenstemming tussen de afgeleide emissies en de inventarisaties zien dan de pluimmethode. Zowel de grotere puntbronnen (Duitse Energiecentrales) als de doelregio's laten een kleinere onderschatting zien, en een betere verdeling rond de 1:1 lijn (Figuur 8).

Tabel 5 Emissies geschat met de divergentie methode voor een oppervlakte van ~550km². Het Ruhrgebied heeft een oppervlakte van ~10 000km². De emissie-totaal worden zowel weergegeven als de totaal emissies binnen het vierkant (grijs, en som binnen het gebiedsmasker voor het Ruhrgebied), als emissies per km² (wit). De tweede kolom geeft het totaal van alle grote puntbronnen die geregistreerd staan in de EPRTTR en de derde kolom de emissies zoals deze in de ER/GRETA/CAMS database zitten. De vierde kolom geeft de schatting van TROPOMI met daarbij de onzekerheid op het totaal.

Naam	Emissies inventarisatie EPRTTR		Emissies inventarisatie ER + GrETA + CAMS		TROPOMI divergentie methode	
	Kt jaar ⁻¹	Ton km ⁻² jaar ⁻¹	Kt jaar ⁻¹	Ton km ⁻² jaar ⁻¹	Kt jaar ⁻¹	Ton km ⁻² jaar ⁻¹
Rotterdam-Rijnmond	5.6	10.5	18.9	35.4	14.6±5.8	27.4±10.9
Maasvlakte	4.6	8.6	16.7	31.3	16.4±6.5	30.8±12.2
Westpoort	1.4	2.6	14.2	26.9	12.4±5.3	23.4±10.0
TATA	7.5	14.3	5.3	24.4	13.0±5.3	24.7±10.1
Eemshaven	3.2	6.1	4.6	9.0	5.0±4.1	9.7±7.9
Chemelot	2.4	4.5	6.3	11.6	8.1±4.7	14.9±8.7
Terneuzen	3.1	5.7	9.2	17.0	9.2±5.1	17.0±9.4
Antwerpen	11.4	21.1	17.9	33.0	20.4±7.5	37.7±13.8
Gent	7.1	13.1	14.5	26.7	9.0±5.0	16.5±9.1
Hamburg	2.8	5.4	14.6	28.5	9.0±4.6	17.4±9.0
Niederausem	41.3	75.9	49.0	90.0	40.3±13.1	74.0±24.0
Neurath	42.3	77.7	47.5	87.3	43.3±13.6	79.5±24.9
Weisweiler	13.8	25.3	17.7	32.4	18.7±7.9	34.1±14.4
Jänschwalde	19.1	35.7	19.5	36.5	12.9±6.3	24.2±11.8
Boxberg	13.5	25.0	13.9	25.8	12.4±5.8	22.9±10.7
Schwarze Pumpe	6.2	11.5	7.0	13.0	10.0±5.3	18.6±9.8
Ruhr gebied	-	-	197.6	19.8	159.4±58.0	16.0±5.8

De getallen in Tabel 5 wijken af van de waarden uit Tabel 4 omdat Tabel 5 is gebaseerd op een analyse gebied van 20x20km² rondom de bron en voor Tabel 4 een gebied met een straal van 10 km rondom de bron is gebruikt. Daarnaast wordt over het gehele Ruhrgebied gesommeerd (circa 100 x 100 km) om de totale emissie voor het industriegebied te bepalen.

Een aantal van de doelregio's, Hamburg, Gent, Westpoort en de Rotterdam Rijnmond regio, geven in de TROPOMI emissieberekening een lagere emissie dan de inventarisaties, terwijl Antwerpen en Terneuzen een hogere emissie laten zien.

De afwijking voor deze regio's valt binnen de berekende onzekerheid en het verschil is dus niet direct te linken aan een mogelijke af(toe)name in de emissies.

Voor elk van deze vier regio's geldt dat een groot deel van de TROPOMI observaties zich op de overgang tussen zee en land bevinden terwijl de emissies over een groter gebied verspreid liggen. Vanwege het verschil in de kwaliteit (bias) tussen observaties over zee en land kunnen er verschillen in het door TROPOMI waargenomen concentratieveld optreden.

Daarnaast kunnen er lokaal variaties in het concentratieveld optreden door de bias met betrekking tot zeer hoge fijnstof concentraties (eerder genoemd in hoofdstuk 4.1), welke rond elk van deze gebieden te verwachten zijn en wat ook geldt over delen van het Ruhrgebied. Lokale variaties in de bias zorgen voor afwijkingen in het divergentieveld en de afgeleide de emissies. Een andere mogelijkheid is een misrepresentatie van de emissievariatie over de tijd. Zoals beschreven in sectie 3.2.2.1 worden de geschatte emissies naar een dag totaal geschaald op basis van een tijdsprofiel zoals deze in het LOTOS-EUROS model wordt gebruikt. Als er een sterkere emissievariatie is over de dag, dan wordt mogelijk de emissie te veel omlaag geschaald.

De locaties met lagere emissies zoals de Eemshaven en Chemelot laten een betere vergelijking zien dan met de pluimmethode. Voor Chemelot vinden we nog steeds een onderschatting in vergelijking met de inventarisatie, wat mogelijk wordt veroorzaakt door de sterke variaties in de concentraties net over de grens in Duitsland (Ruhrgebied) die zoals hierboven genoemd voor een onderschatting kunnen zorgen in de emissies. Voor de sterke puntbronnen zoals TATA en de meeste energiecentrales in Duitsland, behalve Jänschwalde, vinden we ook een betere overeenkomst met de inventarisatie. Voor de energiecentrales binnen het Ruhrgebied lijken de variaties in het concentratie- en divergentieveld de belangrijkste reden voor onderschatting te zijn. Alleen voor de energiecentrale in Jänschwalde vinden we een onderschatting die op het randje van de verwachte onzekerheid ligt. Zoals eerder genoemd zou een sterk verschil in de levensduur van NO₂ een reden kunnen zijn voor de onderschatting maar dit zou dan in principe ook moeten gelden voor de nabijgelegen centrales in Boxberg en Schwarze Pumpe, wat niet het geval is. Zoals eerder genoemd door Beirle et al (2009) speelt de levensduur daarnaast een kleinere rol voor de afgelegen centrales doordat de sterke gradiënt in het divergentie veld de belangrijkste reden voor het gevonden emissietotaal is. Een logischere uitleg is dus een afname van de emissies, wat goed overeen komt met de gerapporteerde sluiting van een deel van de energie centrale, en welk gegeven mogelijk nog niet is opgenomen in de meest recente inventarisatie (2017 t.o.v. de sluiting in 2018/2019, <https://www.eppowereurope.cz/en/companies/janschwalde/>).

5 Discussie en Conclusies

In deze studie hebben we onderzocht of het mogelijk is de relatieve prestatie, in termen van NO_x-uitstoot, van de industrie in het Rotterdamse Haven en Industrieel complex in verhouding tot andere grootschalige haven en/of industriële complexen in West-Europa af te schatten met behulp van satellietdata.

In de uitgevoerde analyses zien we een goede overeenkomst tussen de NO_x emissies afgeleid vanuit TROPOMI satellietdata en de emissies zoals opgenomen in de traditionele inventarisaties. Dat wil zeggen dat de emissiesterkte berekend uit satellietwaarnemingen (met inachtneming van de relatief grote foutmarges) overeenkomen met de traditionele emissie-inventarisaties in noordwest Europa. Daarnaast komt de rangorde van de gebieden (van lage naar hoge emissiedichtheid) grotendeels overeen in beide emissie-bepalingmethoden.

Aan de hand van deze studie concluderen we dat Rotterdam-Rijnmond qua emissie-intensiteit (uitgedrukt in NO₂ emissie per km² per jaar) vergelijkbaar is met vergelijkbare grote zeehavens (Antwerpen/Hamburg). Het onderzoek geeft geen aanwijzingen dat de huidige emissie-inventarisatie voor de Rotterdamse Haven en Industrieel complex voor NO_x (zoals gebruikt in de GDN) incompleet is en of aanpassing behoeft.

Vornoemde conclusies dienen te worden gezien tegen de achtergrond en uitgangspunten van deze studie waarin twee methodes voor de verwerking van de satellietdata zijn toegepast: de zogenaamde pluim methode en de divergentie methode.

Beide methoden laten zien dat met behulp van satellietwaarnemingen informatie over emissies kunnen worden afgeleid. De resultaten laten zien dat de afgeleide emissies die berekend zijn met de pluim methode, gevoelig zijn voor achtergrond variaties. Daarom geven we de voorkeur aan de resultaten van de divergentie methode, ook al levert de pluim methode een snelle eerste schatting op aangezien deze goedkoper is in termen van benodigde rekenkracht.

In het algemeen komen de resultaten van de divergentie methode ook beter overeen met de emissie-inventarisatie dan de resultaten van de pluim methode.

Het TROPOMI satellietproduct en instrumentresolutie zijn thans nog niet goed genoeg om meer te kunnen zeggen over de individuele bronnen binnen de gekozen gebieden. Alleen voor bronnen met dominante emissies ten opzichte van de andere emissies binnen een regio, zoals bij de grote energiecentrales (zoals bijv. Janswalde), kan wel iets gezegd worden. De grootste factor van onzekerheid is het satellietproduct zelf (zie 3.2.1), gevolg door de levensduur (zie 3.3.1 & 3.3.2) en de meteorologie (windvelden, zie 3.2.3). De correctie met behulp van hogere resolutie model data (AMF verbetering, zie 3.2.1) helpt om de onzekerheid te verkleinen, maar voor gebieden met een lagere emissie-intensiteit blijft het product een belangrijke term van onzekerheid. De levensduur schatting kan mogelijk verbeterd worden door een chemie transport model te gebruiken om de belangrijkste verlies termen uit te rekenen.

Hierdoor kan er zowel een ruimtelijke als temporele aanpassing worden gemaakt op de aanname en de emissievelden worden verbeterd. Een andere mogelijkheid is het assimileren van de satellietobservaties in een regionaal model (Chemisch Transport Model – CTM, zoals LOTOS-EUROS). In zulke methodes worden concentratie variaties door chemie en transport direct meegenomen binnen een model, i.p.v. deze af te schatten, en worden zulke processen dus accurater geparameteriseerd, wat de accuraatheid en precisie van de emissieschatting ten goede kan komen.

Voor regio's met veel emissies is het daarnaast mogelijk om kortere intervallen te gebruiken om emissies te schatten. Recente studies (bijv. Lorente et al., 2019) laten al zien dat het mogelijk is om voor de grootste steden dagelijks emissies te berekenen, en in principe is er genoeg data om in het vervolg de maandelijkse emissies te berekenen. Dit is ook van toegevoegde waarde voor de emissie-inventarisatie aangezien de satellietinformatie kan geven over de variatie in de tijd, iets wat tot nu toe vaak in inventarisaties mist. Met de lancering van de eerste geostationaire satellieten (Sentinel-4/TEMPO) zal het daarnaast binnenkort ook mogelijk zijn om variaties in de emissie gedurende de tijd te meten, wat voor een verbetering van de inventarisatie zal zorgen. Daarnaast geeft dat ook de mogelijkheid om bijvoorbeeld de in deze studie aangenomen variaties te valideren en zo de onzekerheid van deze aannames te verkleinen.

De bepaling van een emissietrend en dus monitoring van emissies over een langere tijd is ook mogelijk. Hoewel de meetserie van TROPOMI nog beperkt is (lancering, eind 2017), kunnen in de komende jaren emissie-trends en variaties over de tijd goed in kaart gebracht worden. Een mogelijk eerste voorbeeld, van een zichtbare variatie in de emissies, is de energiecentrale in Jämschwalde. De met TROPOMI afgeleide emissies laten een systematisch lager totaal zien, wat overeenkomt met de verwachte reductie in de emissies als gevolg van de sluiting van twee power units (<https://www.eppowereurope.cz/en/companies/janschwalde/>) van de energie centrale een gegeven dat nog ontbreekt in de (in deze studie) gebruikte emissie-inventarisatie.

De ruimtelijke resolutie in de afgeleide emissies is op dit moment vooral beperkt door de resolutie van het satellietinstrument. Een hogere resolutie kan bereikt worden met bijvoorbeeld vliegtuigmetingen (gebruikmakend van een vergelijkbaar instrument zoals TROPOMI, maar dan op een vliegtuig platform, zoals bijv. Spectrolite (Tack et al., 2019)). Zulke metingen kunnen het aandeel van individuele bronnen beter in kaart brengen.

6 Referenties

- Beirle, S., Borger, C., Dörner, S., Li, A., Hu, Z., Liu, F., Wang, Y. and Wagner, T.: Pinpointing nitrogen oxide emissions from space, *Sci. Adv.*, 5(11), doi:10.1126/sciadv.aax9800, 2019.
- Dammers, E., McLinden, C. A., Griffin, D., Shephard, M. W., Van Der Graaf, S., Lutsch, E., Schaap, M., Gainairu-Matz, Y., Fioletov, V., Van Damme, M., Whitburn, S., Clarisse, L., Cady-Pereira, K., Clerbaux, C., Francois Coheur, P. and Erisman, J. W.: NH₃ emissions from large point sources derived from CrIS and IASI satellite observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 19(19), 12261–12293, doi:10.5194/acp-19-12261-2019, 2019.
- Fioletov, V., McLinden, C., Griffin, D., Theys, N., Loyola, D., Hedelt, P., Krotkov, N. and Li, C.: Anthropogenic and volcanic point source SO₂ emissions derived from TROPOMI onboard Sentinel 5 Precursor: first results, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, (2018), 1–30, doi:10.5194/acp-2019-1095, 2020.
- Fioletov, V. E., McLinden, C. A., Krotkov, N., Moran, M. D. and Yang, K.: Estimation of SO₂ emissions using OMI retrievals, *Geophys. Res. Lett.*, 38(21), 1–5, doi:10.1029/2011GL049402, 2011.
- de Foy, B., Wilkins, J. L., Lu, Z., Streets, D. G. and Duncan, B. N.: Model evaluation of methods for estimating surface emissions and chemical lifetimes from satellite data, *Atmos. Environ.*, 98, 66–77, doi:10.1016/j.atmosenv.2014.08.051, 2014.
- Kuenen, J. J. P., Visschedijk, A. J. H., Jozwicka, M. and Denier van der Gon, H. A. C.: TNO-MACC_II emission inventory; a multi-year (2003–2009) consistent high-resolution European emission inventory for air quality modelling, *Atmos. Chem. Phys.*, 14(20), 10963–10976, doi:10.5194/acp-14-10963-2014, 2014.
- Lorente, A., Boersma, K. F., Eskes, H. J., Veefkind, J. P., van Geffen, J. H. G. M., de Zeeuw, M. B., Denier van der Gon, H. A. C., Beirle, S. and Krol, M. C.: Quantification of nitrogen oxides emissions from build-up of pollution over Paris with TROPOMI, *Sci. Rep.*, 9(1), 1–10, doi:10.1038/s41598-019-56428-5, 2019.
- 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., Segers, A. J., Timmermans, R. M. A., Visschedijk, A., 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 Uff, B., van Velthoven, P., Banzhaf, S., Mues, A., Stern, R., Fu, G., Lu, S., Heemink, A., van Velzen, N. and Schaap, M.: Curriculum Vitae of the LOTOS-EUROS (v2.0) chemistry transport model, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 1–53, doi:10.5194/gmd-2017-88, 2017.
- McLinden, C. A., Fioletov, V., Boersma, K. F., Kharol, S. K., Krotkov, N., Lamsal, L., Makar, P. A., Martin, R. V., Veefkind, J. P. and Yang, K.: Improved satellite retrievals of NO₂ and SO₂ over the Canadian oil sands and comparisons with surface measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 14(7), 3637–3656, doi:10.5194/acp-14-3637-2014, 2014.
- McLinden, C. A., Fioletov, V., Shephard, M. W., Krotkov, N., Li, C., Martin, R. V., Moran, M. D. and Joiner, J.: Space-based detection of missing sulfur dioxide sources of global air pollution, *Nat. Geosci.*, 9(7), 496–500, doi:10.1038/ngeo2724, 2016.
- Schneider, C., Pelzer, M., Toenges-Schuller, N., Nacken, M. and Niederau, A.: ArcGIS basierte Lösung zur detaillierten, deutschlandweiten Verteilung (Gridding) nationaler Emissionsjahreswerte auf Basis des Inventars zur

Emissionsberichterstattung. Technical report [in German]. Dessau-Roßlau. Technical report [in German]. Dessau-Roßlau, [online] Available from: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/med%0Aien/1968/publikationen/2016-11-09_griddingtool_greta_%0Alangfassung_final.pdf (, 2016.

Seinfeld, J. H.: Urban Air Pollution: State of the Science, *Science* (80-.), 243(4892), 745 LP – 752, doi:10.1126/science.243.4892.745, 1989.

Tack, F., Merlaud, A., Meier, A. C., Vlemmix, T., Ruhtz, T., Iordache, M.-D., Ge, X., van der Wal, L., Schuettmeyer, D., Ardelean, M., Calcan, A., Constantin, D., Schönhardt, A., Meuleman, K., Richter, A. and Van Roozendaal, M.: Intercomparison of four airborne imaging DOAS systems for tropospheric NO_2 mapping -- the AROMAPEX campaign, *Atmos. Meas. Tech.*, 12(1), 211–236, doi:10.5194/amt-12-211-2019, 2019.

Verhoelst, T., Compernelle, S., Pinardi, G., Lambert, J.-C., Eskes, H., Eichmann, K.-U., Fjæraa, A. M., Granville, J., Niemeijer, S., Cede, A., Tiefengraber, M., Hendrick, F., Pazmiño, A., Bais, A., Bazureau, A., Boersma, K. F., Bogner, K., Dehn, A., Donner, S., Elokho, A., Gebetsberger, M., Goutail, F., Grutter de la Mora, M., Gruzdev, A., Gratsea, M., Hansen, G., Irie, H., Jepsen, N., Kanaya, Y., Karagiozidis, D., Kivi, R., Kreher, K., Levelt, P., Liu, C., Müller, M., Navarro Comas, M., Pitters, A., Pommereau, J.-P., Portafaix, T., Puentedura, O., Querel, R., Remmers, J., Richter, A., Rimmer, J., Rivera Cárdenas, C., Saavedra de Miguel, L., Sinyakov, V., Strong, K., Van Roozendaal, M., Veefkind, J. P., Wagner, T., Wittrock, F., Yela González, M. and Zehner, C.: Ground-based validation of the Copernicus Sentinel-5p TROPOMI NO_2 measurements with the NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS and Pandora global networks, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, 1–40, doi:10.5194/amt-2020-119, 2021.

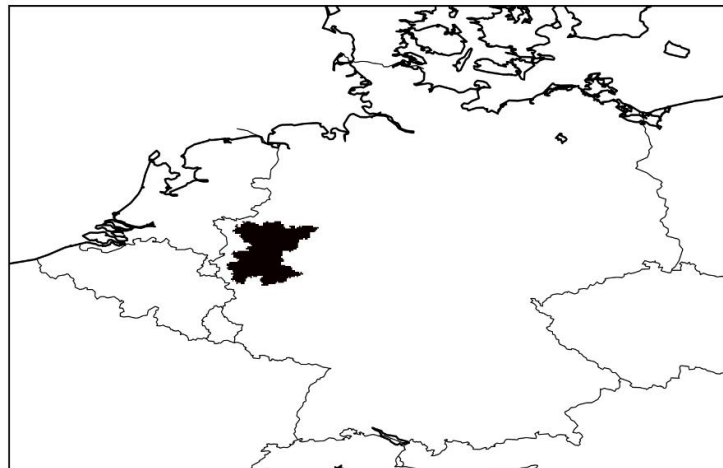
7 Annex

7.1 Definitie Ruhrgebied

Voor het Ruhrgebied (voorbeeld in Figuur 9) zijn de volgende gemeentes meegenomen;

Duisburg Städte, Oberhausen Städte, Bottrop Städte, Mülheim Städte, Essen Städte, Gelsenkirchen Städte, Bochum Städte, Herne Städte, Hagen Städte, Dortmund Städte, Hamm Städte, Wesel, Recklinghausen, Unna, Ennepe-Ruhr, Düsseldorf Städte, Rhein-Kreis Neuss, Mönchengladbach Städte, Wuppertal Städte, Cologne Städte, Bonn Städte, Leverkusen Städte, Solingen Städte, Rhein-Sieg, Rheinisch-Bergischer Kreis, Remscheid Städte, Mettmann, Düren, Rhein-Erft-Kreis.

Definitie Ruhrgebied



Figuur 9 Definitie van het Ruhrgebied.

8 Ondertekening

Naam en adres van de opdrachtgever:

Provincie Zuid-Holland

Postbus 90602

2509 LP Den Haag

T 070 - 441 66 11

www.zuid-holland.nl

Naam en functies van medewerkers:

Datum waarop of tijdsbestek waarin het onderzoek heeft plaatsgehad:

November 2020 – Maart 2021

Naam en paraaf tweede lezer:

Ondertekening:

Project Manager

Autorisatie vrijgave:

Deputy Research Manager