



CurieuzeNeuzen Vlaanderen

Het cijferrapport

Een initiatief van



VLAAMSE
MILIEUMAATSCHAPPIJ

dS De
Standaard

Met ondersteuning van



DOCUMENTBESCHRIJVING

TITEL

CurieuzeNeuzen Vlaanderen: Het cijferrapport

DATUM PUBLICATIE

29 September 2018

AUTEURS

Prof. dr. ir. Filip Meysman
Dr. Sam de Craemer
Departement Biologie
Universiteit Antwerpen

REVIEWERS

MSc. Frans Fierens (VMM-IRCEL)
Ir. Elke Trimpeneers (VMM-IRCEL)
Dr. Jordy Vercauteren (VMM)
Dr. Wouter Lefebvre (VITO)

INHOUD

Dit rapport geeft een beschrijving van het wetenschappelijke onderzoek in het kader van het CurieuzeNeuzen Vlaanderen project. Het rapport beschrijft de (1) de data verzameling met behulp van burgers, (2) de verwerking van de meetresultaten tot een kwaliteitsgecontroleerde dataset en (3) een basis statistische analyse die de eerste trends en inzichten oplevert.

WIJZE VAN REFEREREN

F. J. R. Meysman en S. De Craemer (2018) "CurieuzeNeuzen Vlaanderen: Het cijferrapport". 56 p. Universiteit Antwerpen.

VERANTWOORDELIJKE UITGEVER

Prof. dr. ir. Filip Meysman, Universiteit Antwerpen

VRAGEN IN VERBAND MET DIT RAPPORT

info@curieuzeneuzen.be

Hoofdstuk 1: Inleiding

1.1. Doelstelling CurieuzeNeuzen Vlaanderen

Het citizenscience-project “CurieuzeNeuzen Vlaanderen” wil de NO₂ concentraties in de buitenlucht in Vlaanderen zeer fijnmazig in kaart te brengen. NO₂ is een indicator voor verkeersgerelateerde luchtvervuiling. Het project is een samenwerking tussen de Universiteit Antwerpen, de Vlaamse Milieumaatschappij en de krant De Standaard, met ondersteuning van HIVA-KU Leuven en VITO. Het project heeft een duidelijk omlijnd wetenschappelijk doel. Twintigduizend deelnemers ontvangen een meetpakket om de NO₂ concentratie in hun straat te meten, wat resulteert in een ongezien uitgebreide en internationaal toonaangevende dataset. Deze data worden vervolgens vergeleken met computersimulaties van de luchtkwaliteit in Vlaanderen, met als doel het onderliggende ATMO-Street computermodel te verbeteren. Dit laat toe om de impact van verkeer op de luchtkwaliteit beter te kwantificeren, met een performantere beleidsondersteuning tot gevolg.

Het is internationaal de eerste keer dat op een dergelijke grote schaal burgers actief betrokken worden bij een wetenschappelijke project rond luchtkwaliteit. Naast de wetenschappelijke doelstelling, wil CurieuzeNeuzen Vlaanderen de bevolking sensibiliseren en informeren, en dit zowel op het vlak van luchtkwaliteit als op het vlak van STEM. Het project wil de inwoners van Vlaanderen bewust maken van het belang van een gezonde leefomgeving, en demonstreren hoe wetenschappelijk onderzoek kan ingezet worden om maatschappelijke uitdagingen op het vlak van mobiliteit, ruimtelijke planning en technologie aan te pakken om de luchtkwaliteit te verbeteren.

1.2. Inhoud van dit rapport

Het wetenschappelijke onderzoek in het CurieuzeNeuzen Vlaanderen project bestaat uit vijf verschillende fasen:

1. De data verzameling met behulp van burgers
2. De verwerken van de meetresultaten tot een kwaliteitsgecontroleerde dataset
3. Een basis statistische analyse die de eerste trends en inzichten oplevert
4. Een doorgedreven analyse op basis van multivariate statistiek
5. Een model-data vergelijking m.b.v. het ATMO-Street computermodel

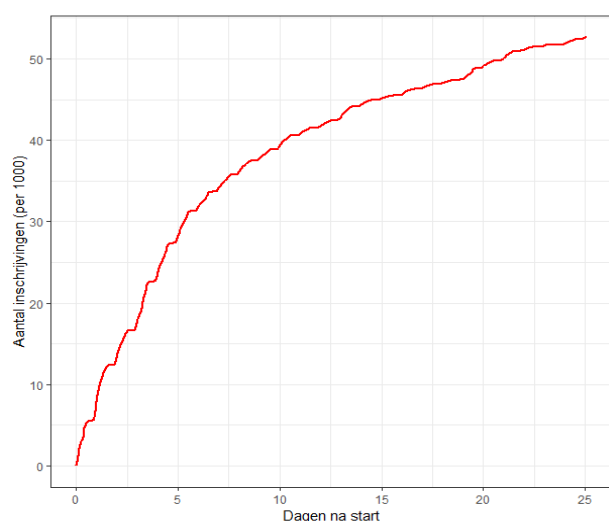
Dit rapport beschrijft de eerste 3 stappen.

Hoofdstuk 2: De CurieuzeNeuzen dataset

2.1. Respons en inschrijvingen

Het “CurieuzeNeuzen Vlaanderen” project werd gelanceerd en publiek bekend gemaakt op 24 februari. Dit was ook het startschot van een **intensieve, multimediale wervingscampagne** (TV-spots, radiosspots, printadvertenties, etc.). Het doel was om het project bekend te maken in Vlaanderen en de Vlaming warm te maken om deel te nemen.

Een website werd geopend waar kandidaat deelnemers zich konden aanmelden. De inschrijving gebeurde door het invullen van een **webform op de website** (www.CurieuzeNeuzen.be), waarbij de deelnemers ook meta-informatie doorgaven over hun woonlocatie en straat. Deze informatie werd in volgende stap gebruikt om de meest geschikte meetlocaties te kiezen. Deze metadata zal ook gebruikt worden in verdere statistische analyse.



Figuur 1. Tijdsverloop van de inschrijvingen.

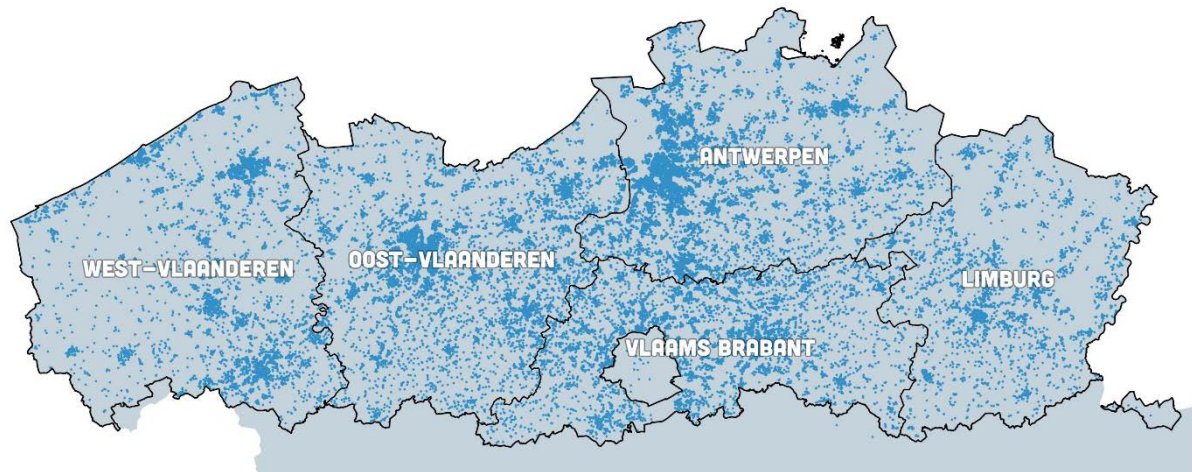
De wervingscampagne liep in totaal drie weken. **Figuur 1** geeft een overzicht van hoe de inschrijvingen verliepen in de tijd. Na 2 dagen werden reeds 10.000 inschrijvingen geteld, na 5 dagen werd de kaap van 30.000 inschrijvingen overschreden.

In totaal schreven 52.630 kandidaten zich in voor het project (Tabel 1). De meeste inschrijvingen kwamen van particulieren/gezinnen ($n = 94,6\%$), maar ook scholen stelden zich massaal kandidaat ($n = 1,8\%$) alsook bedrijven ($n = 1,7\%$), organisaties ($n = 1,8\%$) en overheidsinstellingen ($n = 1,1\%$).

Type inschrijvingen	Aantal	Percentage
Gezinnen	49.778	94,6%
Scholen	967	1,8%
Bedrijven	920	1,7%
Organisaties	965	1,8%
Gemeentebesturen (en andere overheid)	597	1,1%
Totaal	52.630	100%

Tabel 1. Overzicht van het aantal inschrijvingen voor het citizen science project CurieuzeNeuzen Vlaanderen.

Het ruimtelijk patroon van de inschrijvingen reflecteert in grote lijnen de bevolkingsdichtheid in Vlaanderen. De grootsteden Antwerpen en Gent leverden een relatief groot aantal inschrijvingen aan.



Figuur 2: Verspreiding van de inschrijvingen over Vlaanderen. Elke blauwe stip is een inschrijving. Het ruimtelijk patroon van inschrijvingen reflecteert de bevolkingsdichtheid in Vlaanderen.

2.2. Selectie meetpunten

Er waren in totaal 52.630 kandidaat meetlocaties, daar waar slechts 20.000 meetpakketten beschikbaar waren voor het project. Een selectie van meetlocaties diende dus doorgevoerd. Dit zorgde voor ontgoocheling bij kandidaat deelnemers die niet geselecteerd werden (wat zeer begrijpelijk was). Maar vanuit puur wetenschappelijk oogpunt was dit overaanbod een belangrijke troef. Het liet immers toe een optimale keuze te maken van de meetlocaties in functie van de wetenschappelijke doelstellingen van het project, i.e., de vergelijking van NO₂ meetdata met computer simulaties van de ATMO-Street modelketen. Dit is een geavanceerd state-of-the-art computer model voor luchtkwaliteit, gebaseerd op een integratie van drie verschillende modellen: het RIO interpolatiemodel¹, het bi-Gaussiaans dispersiemodel IFDM² en het street canyon effecten model OSPM³.

De selectie van de 20.000 meetlocaties gebeurde op basis van een aantal wetenschappelijke criteria (computer gestuurd en op basis van een zelf ontwikkeld algoritme).

- Meetlocatie gelegen aan de straatkant.
- Bij voorkeur meting op de eerste verdieping.
- Een zo goed mogelijke ruimtelijke spreiding over Vlaanderen.
- Evenwichtige balans tussen stedelijk en landelijk meetlocaties. Om de lokale variaties in NO₂-concentratie te kunnen vatten was de densiteit aan meetlocaties in steden groter. De

¹ Janssen, S., Dumont, G., Fierens, F., & Mensink, C. (2008). "Spatial interpolation of air pollution measurements using CORINE land cover data." *Atmospheric Environment* 42 (20): 4884-4903.

² Lefebvre, W., M. Van Poppel, B. Maiheu, S. Janssen & E. Dons. "Evaluation of the RIO-IFDM-Street Canyon Model Chain." *Atmospheric Environment* 77 (October 2013): 325-37.

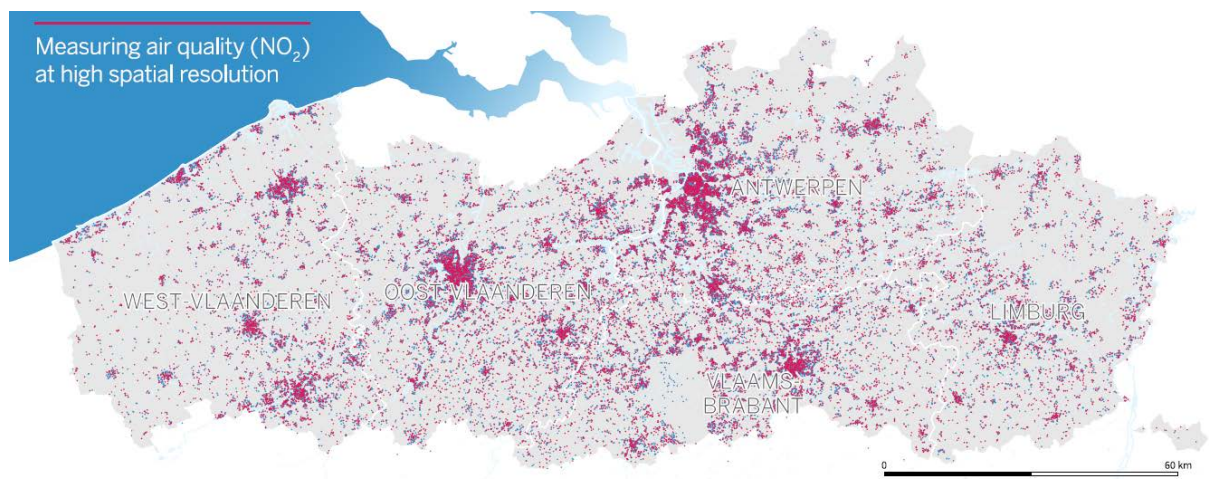
³ Berkowicz, R. (2000). "OSPM-A parameterised street pollution model." *Environmental monitoring and assessment* 65 (1-2), 323-331.

gemiddelde afstand tussen meetlocaties (in vogelvlucht) in de selectie varieerde van ~100 m in steden tot ~ 500 m op het platteland.

- Het te valideren ATMO-Street model bestaat uit drie verschillende modules, die gecombineerd aangewend worden naargelang de locatie van het meetpunt (enkel RIO, dan wel RIO-IFDM, of RIO-IFDM-OSPM). De selectie moest voldoende punten bevatten van elk type om de prestaties van specifieke modules te evalueren:
 - o RIO: voornamelijk achtergrond, weinig lokale bijdrage
 - o IFDM: sterke lokale bijdrage van verkeer, geen street canyon
 - o OSPM: punten in een street canyon.
- Voldoende punten met en zonder informatie over de verkeersintensiteit (data over verkeersstromen Vlaanderen 2014 aangeleverd door het Vlaams Verkeerscentrum) om de invloed van verkeer (en de beschikbaarheid van verkeersinformatie) op de resultaten te kunnen nagaan.

Naast de 20.000 primair geselecteerde meetlocaties werd ook een reservelijst van 5000 punten aangelegd (meetlocaties op de eerste verdieping aan de straatkant, <25m van de straat verwijderd, gespreid over steden en het platteland).

De 20.000 primair geselecteerde deelnemers kregen 5 dagen de tijd om hun deelname aan de meting te bevestigen en het deelname bedrag aan het project (10 €) te betalen. Daarna werd de reservelijst aangesproken tot het deelnemersaantal van 20.000 bereikt was.



Figuur 3: De 20.000 geselecteerde meetpunten (paars) en 32.630 niet-geselecteerde inschrijvingen (blauw).

2.3.Data recovery

In totaal werden 20.000 meetpakketten verzonden naar de deelnemers. De meetcampagne liep van 28 april 2018 tot 26 mei 2018. Op een beperkt aantal meetlocaties heeft de meting niet tot een geldig meetresultaat geleid. De verschillende redenen hiervoor worden opgesomd in **Tabel 2** en hieronder kort beschreven.

Parameter	Uitval		Resterend	
Aantal meetlocaties			20000	100%
Meting fysiek mislukt	159	0.8%	19841	99,2%
Ontbrekende metadata	358	1.8%	19483	97,4%
Verloren tijdens transport	178	0.9%	19305	96,5%
Probleem tijdens analyse	138	0.7%	19167	95,8%
Verdachte hoge of lage waarden	12	0.1%	19155	95,8%

Tabel 2: Overzicht van de oorzaken waarom metingen niet geldig zijn.

Meting fysiek mislukt

Bij een beperkt aantal deelnemers (n=159 of 0.8%) is de meting fysiek mislukt (bv. omdat het meetpakket niet werd afgehaald, omdat het bord afgewaaid is door een storm, omdat deelnemers de meetbuisjes ondersteboven hebben gehangen zodat ze vol water liepen...) en werden er geen meetbuisjes terug gestuurd. Mensen in deze categorie hebben de project-helpdesk (info@curieuzeneuzen.be) per mail gecontacteerd om dit te melden, ofwel hebben ze dit als opmerking aangegeven in het webform bij het einde van de meting.

Ontbrekende metadata

Een aantal deelnemers (n=358 of 1.8%) volgde het meetprotocol niet correct. De belangrijkste reden hiervoor was het niet correct aanleveren van de gevraagde metadata die nodig is voor het berekenen van de maandgemiddelde NO₂ concentratie (bv. ontbreken van begin- en/of eindtijd van de meting, ontbreken van locatie van het meetpunt). Deze deelnemers werden meerdere keren per mail gecontacteerd maar gaven niet de juiste respons.

De recovery graad wordt gedefinieerd als het percentage van metingen waarbij zowel de metingen fysiek gelukt zijn alsook de metadata correct werden aangeleverd. Deze **recovery graad is 97.4%**, wat extreem hoog is voor een citizen science project. Het **illustreert dat de deelnemers zeer gemotiveerd waren om hun meting correct te volbrengen (en dus hun persoonlijke meetresultaat te weten)**.

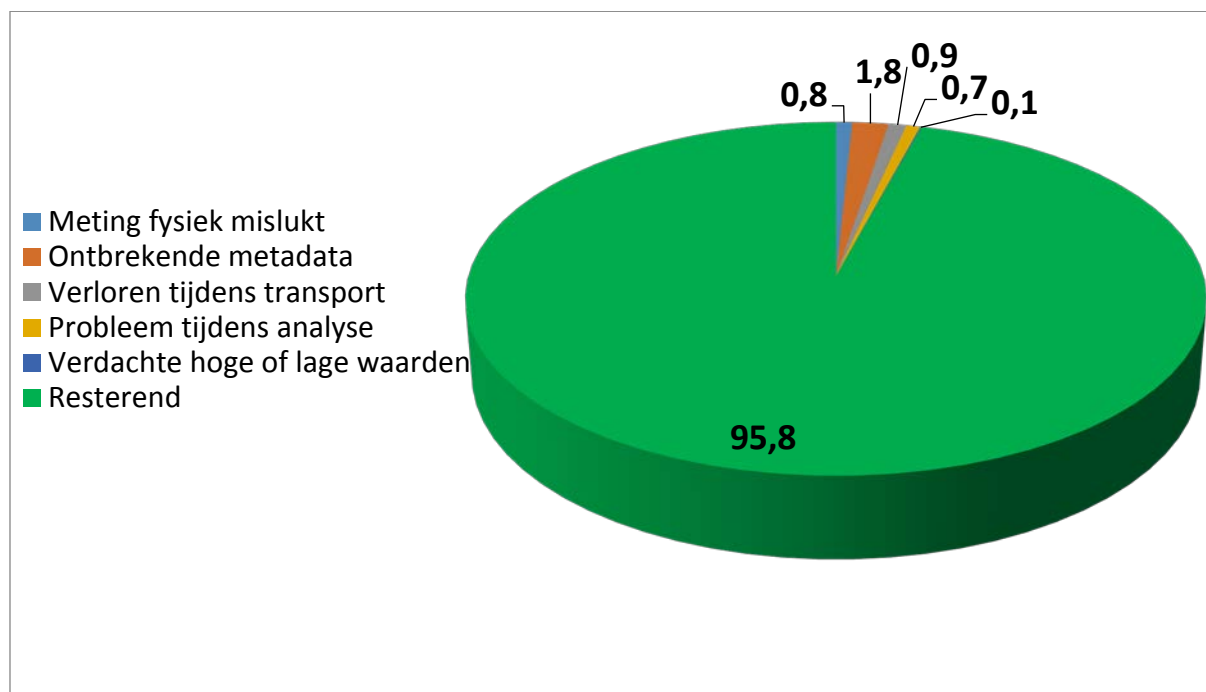
Verloren tijdens transport

Een klein aantal van de meetsets (n=178 of 0.8%) ging op een of andere wijze verloren tijdens het transport naar het laboratorium.

Probleem tijdens analyse

Bij een klein aantal deelnemers (n=138 of 0.7%) werd er een probleem gedetecteerd tijdens de analyse. Sommige meetbuisjes vertoonden bij inspectie in het labo een verontreiniging (bv. water in de meetbuisje, spinnenweb in het meetbuisje), of er was een probleem met het coderen van de meetbuisjes (bv. deelnemer heeft verkeerde code ingevoerd in website, de fabrikant van het meetbuisje heeft code-fout gemaakt). Voor een aantal meetsets werd een zelfde zeer lage waarde

voor beide meetbuisjes bekomen, vergelijkbaar met een blanco meting (waarschijnlijk omdat de gele doppen niet verwijderd werden tijdens het experiment). Ook metingen waarbij de meetperiode minder dan 14 dagen was (dus minder dan de helft van de voorziene meetperiode) werden als ongeldig gecategoriseerd. Metingen die meer dan 14 dagen maar minder dan 24 dagen hadden plaatsgevonden, werden weliswaar als 'geldig' gecategoriseerd maar werden niet weerhouden voor de verdere statistische analyse en modelvergelijking (zie verder).



Figuur 4. Overzicht van de oorzaken waarom metingen niet geldig zijn.

Verdachte hoge of lage waarden

De hoogste waarden ($>55 \mu\text{g m}^{-3}$, $N=26$) en laagste waarden ($< 12 \mu\text{g m}^{-3}$, $N=34$) in de dataset werden apart gecontroleerd en geplot op de stippenkaart, om te bekijken of deze meetwaarden volgens de verwachting zijn in hun ruimtelijke context. De hoogste waarden lagen stevast op punten waar hoge waarden worden verwacht (en meestal in de buurt van andere hoge waarden), en dus werden ze allen behouden. De laagste waarden lagen soms op plekken waar de achtergrondwaarde voor NO_2 duidelijk hoger lag, wat hen verdacht maakte. Uiteindelijk werden 12 meetresultaten lager dan $10 \mu\text{g m}^{-3}$ uit de dataset geweerd, op verdenking van (ongerapporteerde) meetproblemen. Dit is volgens verwachting, omdat de meeste gebruikelijke meetfouten en meetproblemen (bv. water in de meetbuisjes) leiden tot te lage resultaten.

Geldige metingen

In sommige gevallen ging de analyse mis in 1 van de twee meetbuisjes, om dezelfde redenen als reeds boven besproken (bv. water in het meetbuisje). Deze metingen werden weerhouden als "geldig", en het resultaat werd gerapporteerd aan de deelnemers, maar deze data werden bij de verdere statistische analyse en model/data analyse niet gebruikt (zie sectie 2.8).

Conclusie: In 95,8% van de gevallen ($n=19155$) leverde het project een geldige meting voor de meetlocatie. Daarbij was de meetperiode groter dan 14 dagen, en was er minstens een meetresultaat per meetlocatie beschikbaar. Deze geldige metingen vormen de data punten die op de stippenkaart worden weergegeven, en dus ook als resultaat doorgegeven aan de deelnemers. De

deelnemers met een ongeldige meting werden vooraf op de hoogte gebracht waarom hun meting niet succesvol was.

2.4. Bepaling van de NO₂-concentratie

Elk meetbuisje bevat een met tri-ethanolamine geïmpregneerd gaasje. Bij contact met het gaasje wordt de NO₂ in de lucht gebonden in de vorm van nitraat. Een chemische analyse bepaalt de massa (m) aan nitraat die op het gaasje verzameld is. De formule voor het bepalen van de gemiddelde concentratie van NO₂ op de meetlocatie tijdens de meting uit de massa nitraat op het gaasje is de volgende:

$$C = \frac{m_s - m_b}{\theta * t} * \frac{T}{T_{ref}} * \frac{P_{ref}}{P} \quad (1)$$

$$\theta = D \frac{A}{L} \quad (2)$$

$$D = D_{ref} * \left(\frac{T}{T_{refd}}\right)^{1,81} \quad (3)$$

Met in formule (1):

C – gemiddelde concentratie NO₂ gedurende meting (µg m⁻³)

m_s – massa nitriet in sample gemeten in het laboratorium (µg)

m_b – massa nitriet in blanco gemeten in het laboratorium (µg)

θ – opnamesnelheid van de bemonstering (m³ s⁻¹)

t – duur van de meting - tijd tussen openen en sluiten meetbuisjes (s)

T – gemiddelde temperatuur op meetpunt (K)

T_{ref} – referentietemperatuur (293 K)

P – gemiddelde druk in atmosfeer op meetpunt (kPa)

P_{ref} – referentiedruk (101,3 kPa)

θ wordt berekend via formule (2), met:

D – diffusiecoëfficiënt van NO₂ (m² s⁻¹)

A - doorsnede buisjes (8,1 * 10⁻⁵ m²)

L – lengte buisjes (7,9 * 10⁻² m)

D wordt gecorrigeerd voor de temperatuur via formule (3), met:

D_{ref} – referentie diffusie coëfficiënt van NO₂ (1,54*10⁻⁵ m² s⁻¹ bij 298K)

T – gemiddelde temperatuur op meetpunt (K)

T_{refd} – referentietemperatuur (298 K)

n – exponent op basis van wetenschappelijke literatuur (1,81)

De druk heeft een geringe invloed op het resultaat, vandaar dat de gemiddelde druk in Vlaanderen voor de maand mei werd gebruikt (1015.5 hPa; data KMI België via ftp.ncdc.noaa.gov). De invloed van de temperatuur is iets groter, een verschil van 3°C (het verschil tussen extremen in Vlaanderen tijdens meetperiode op basis van de temperatuurkaart in **Figuur 7**) zou tot een verschil in berekende concentratie van ~1% leiden. Om die reden hebben we de gemiddelde temperatuur op de meetlocatie gebruikt i.p.v. 1 gemiddelde temperatuur voor Vlaanderen. Deze lokale temperatuur werd bekomen uit een gevalideerde temperatuurkaart voor Vlaanderen gegenereerd voor de CurieuzeNeuzen meetperiode (data-assimilatie ECMWF weermodel en temperatuurmetingen uit telemetrische luchtmeetnetten en temperatuurdatabank van KMI België door IRCEL - **Figuur 7**).

2.5. De gekalibreerde dataset

Passieve samplers zijn minder accuraat zijn dan de officiële referentiemetingen. Meestal zorgen ze voor een onderschatting t.o.v. referentiemetingen. Om het verschil te bepalen ten opzichte van de officiële referentiemetingen, werd een CurieuzeNeuzen meetopstelling opgehangen aan 21 VMM referentiestationen (**Figuur 5**). Aan elk referentiestation werd dicht bij de inlaat een CurieuzeNeuzen meetbord geplaatst met 4 passieve samplers (de CurieuzeNeuzen meetopstelling bij de deelnemers heeft 2 passieve samplers). Uiteindelijk had 1 referentiestation onvoldoende data tijdens de CN meetperiode, dus is de kalibratie gebaseerd op de andere 20 VMM referentiestationen.



Figuur 5: Een meetbord bevestigd aan een VMM-meetstation.

De referentie concentratie werd voor elk VMM station bepaald als het rekenkundige gemiddelde van de continue NO₂ meting over de exacte periode dat de passieve samplers aan het station werden opgehangen (afwijking begin en eindtijd maximum 15 minuten). Drie statistische modellen werden toegepast om de systematische verschillen tussen de CN-meetopstelling en de referentie meting te beschrijven (zie ook **Figuur 6**):

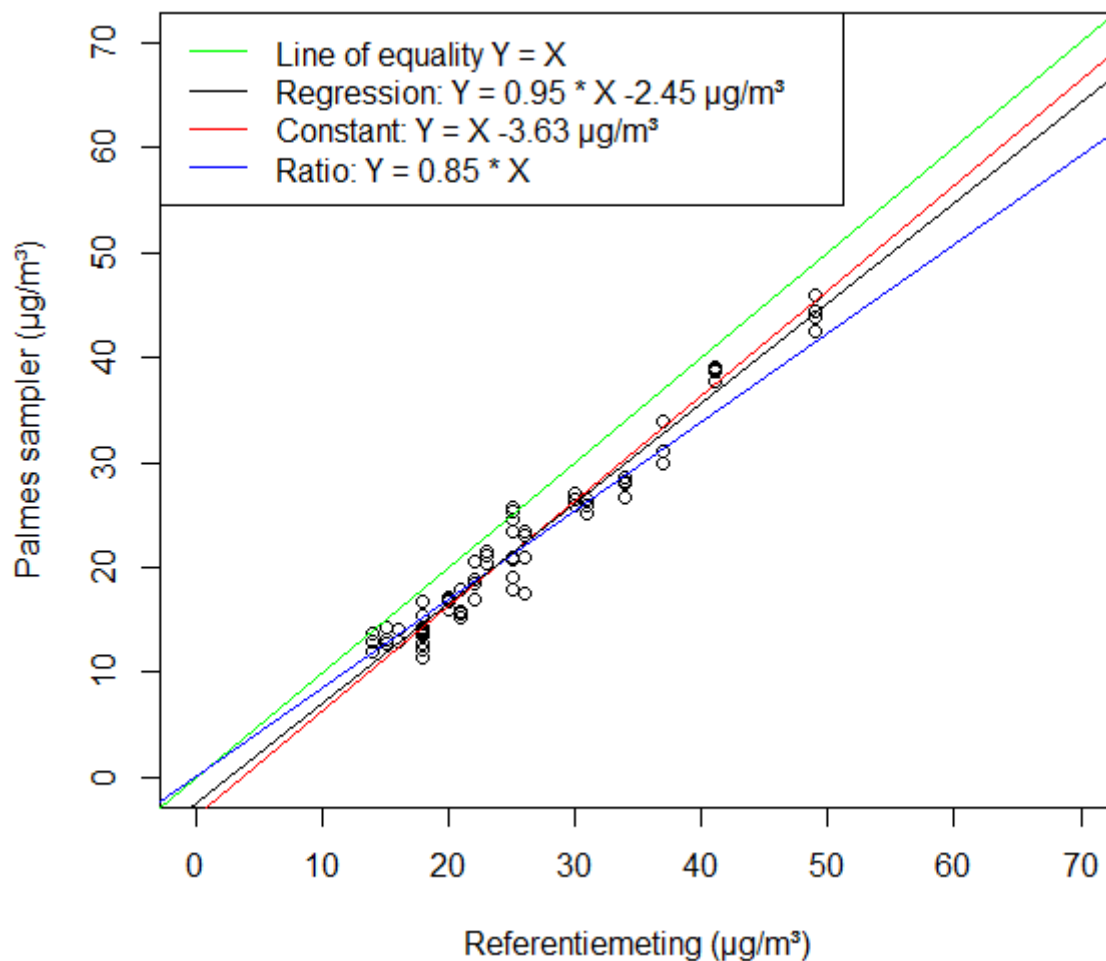
- Model A: Een constante absolute afwijking: $Y = A + X$
- Model B: Een constante relatieve afwijking: $Y = A * X$
- Model C: Een combinatie van beiden: $Y = A + B * X$

Een orthogonale regressie techniek ('Deming regression' met variantie ratio 1) werd gebruikt, die zowel rekening houdt met de observationele fout op de x-as als op de y-as. Op basis van een 'jackknife' analyse (ook wel 'leaving-one-out' analyse genoemd) werd de onzekerheid op de drie toegepaste modellen bepaald. Daaruit bleek dat het model met een constante absolute afwijking de

kleinste onzekerheid had van de drie modellen. Dit model werd vervolgens gebruikt voor kalibratie, en de gekalibreerde NO₂ concentraties werden bepaald als

$$C_{\text{gekalibreerd}} = C_{\text{ruw}} + 3.63 \mu\text{g m}^{-3}$$

Dit levert dus de gekalibreerde NO₂ dataset voor de maand mei op. Concreet betekende dit dus dat de passieve samplers op iedere meetplaats een resultaat gaven dat 3.61 $\mu\text{g m}^{-3}$ lager lag dan de referentiemetingen. Hoewel deze afwijking aanzienlijk kan verschillen van meetperiode tot meetperiode, ligt deze afwijking dicht bij de waarde van 3.35 $\mu\text{g m}^{-3}$ die VMM eerder vond voor haar meetnet passieve samplers in 2017⁴.



Figuur 6. Vergelijking sampler en referentiemeting aan 20 VMM stations (elke Palmer tube afzonderlijk), met lijn van gelijkheid. Aangegeven zijn verschillende benaderingen voor de afwijking (zie legende). De constante is het gemiddelde verschil tussen de metingen, en de ratio de gemiddelde verhouding.

⁴ VMM(2018) Jaarrapport Lucht - Emissies 2000-2016 en luchtkwaliteit 2017

2.6. Weer tijdens de meetperiode

Weerfenomenen zoals temperatuur, wind en regen hebben vaak een groot effect op de concentraties van pollutanten in de lucht en dus ook op de concentraties van NO₂. Indien de meimaand uitzonderlijke weersomstandigheden kent, kan dit de interpretatie van de resultaten beïnvloeden. Om het specifiek effect van het weer tijdens de meetperiode deels op te vangen worden de meiwaarden omgerekend naar een indicatief jaargemiddelde (zie 1.7). Desondanks is het toch aangewezen om het weer tijdens de meetperiode onder de loep te nemen. Dit doen we door de meteogegevens van mei 2018 te vergelijken met meteogegevens van meimaanden in de voorafgaande jaren.

De KMI meteo gegevens (**Figuur 9**) tonen aan dat mei 2018 beduidend warmer was dan de referentieperiode 1981-2010. De temperatuur was ook niet uniform verhoogd over Vlaanderen. Het noorden van de provincie Antwerpen, het noordoosten van Limburg en de Voerstreek waren gemiddeld 3.5 graden warmer dan normaal terwijl de kustzone maar 1 tot 2 graden warmer was dan normaal. Mede door deze sterke temperatuurgradiënt over Vlaanderen werd in de berekening van de ruwe NO₂ data een lokale temperatuur gebruikt i.p.v. eenzelfde temperatuur over gans Vlaanderen (zie sectie 2.4).

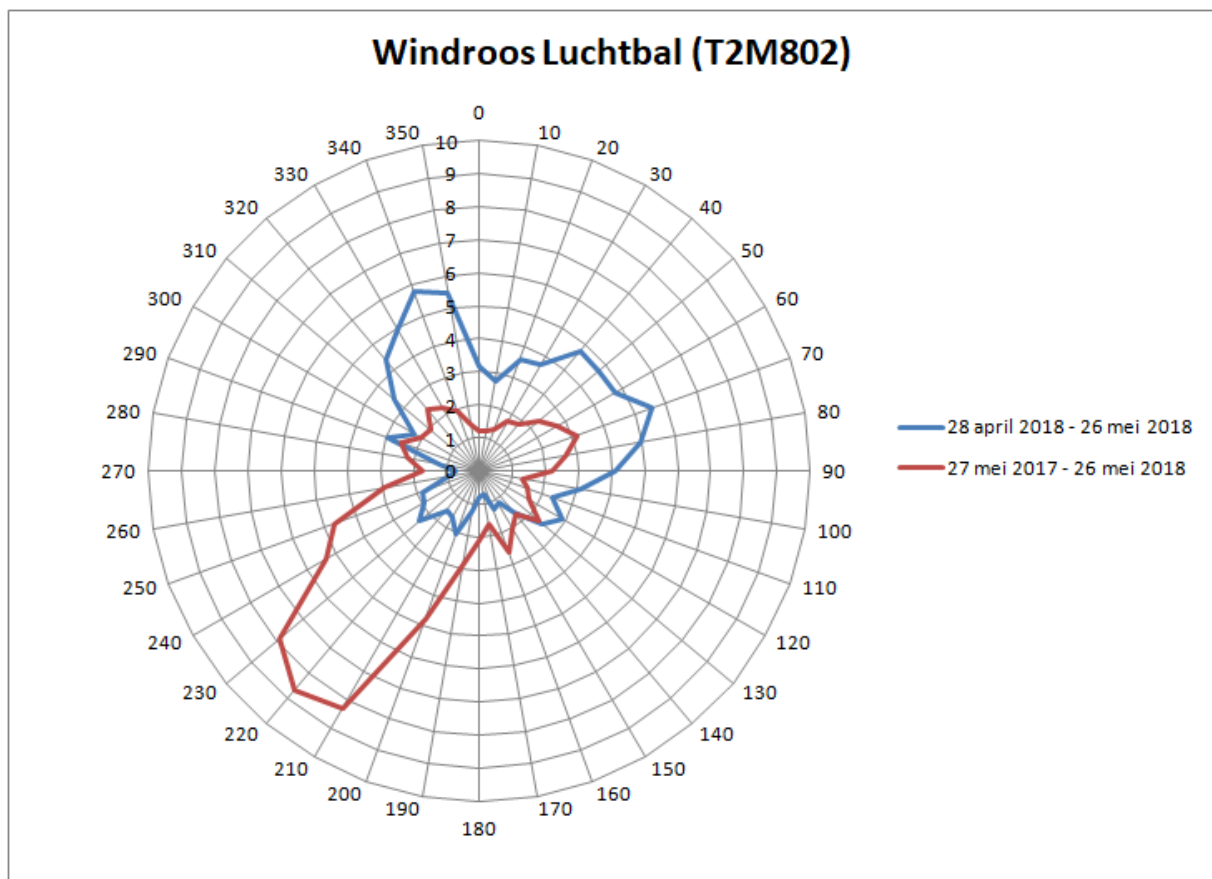


Figuur 7. Gemiddelde temperatuur tijdens de meetperiode van CurieuzeNeuzen.

In mei 2018 is er over het algemeen weinig neerslag gevallen in Vlaanderen. Verminderde neerslag (en dus verminderde uitwassing van NO₂ uit de atmosfeer) zorgt voor hogere concentraties t.o.v. een normale situatie.

Er was relatief meer noordoostenwind dan normaal over een jaar (**Figuur 8**). Hierdoor zullen plaatsen ten zuidwesten van drukke wegen tijdens de meimaand meer NO₂ ontvangen dan gemiddeld over een jaar. Omgekeerd zullen plaatsen ten noordoosten van drukke wegen minder NO₂ ontvangen hebben dan gemiddeld over een jaar. Dit effect kan lokaal voor extra onzekerheid zorgen bij het berekenen van het indicatieve jaargemiddelde. Het effect van deze over- en onderschattingen hangt echter zeer sterk af van de lokale situatie, waardoor het op dit moment onmogelijk gekwantificeerd kan worden. Een model-data vergelijking zal worden uitgevoerd om dit effect verder te onderzoeken.

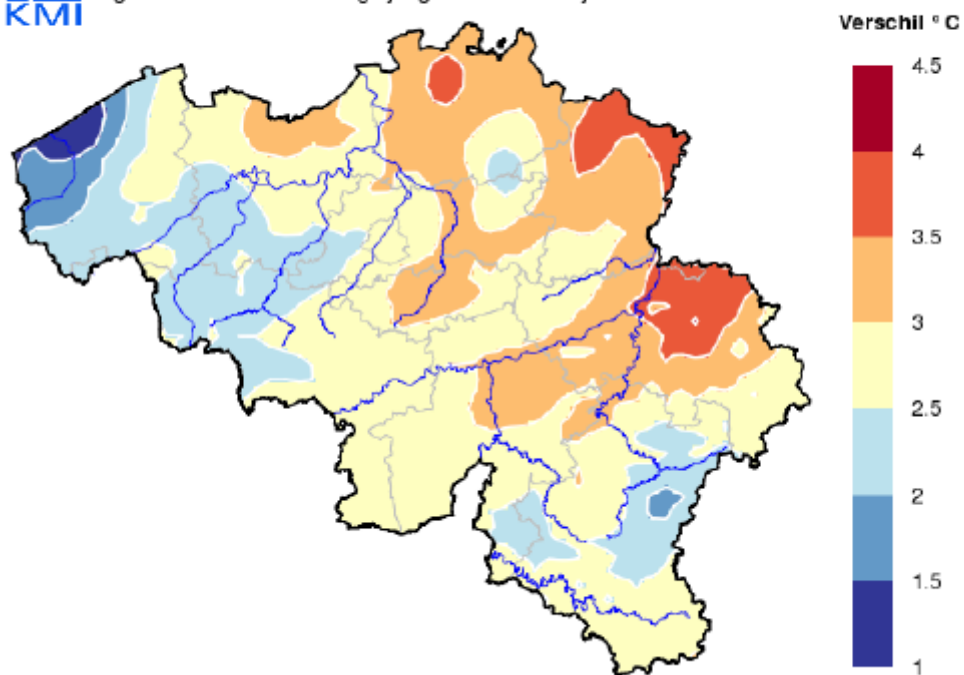
Op de algemene inzichten verwachten we echter geen sterke invloed van het windeffect. De dataset over Vlaanderen in zijn geheel bevat zowel verhoogde als verlaagde waarden, waardoor het windeffect in de statistische analyse zal uitmiddelen.



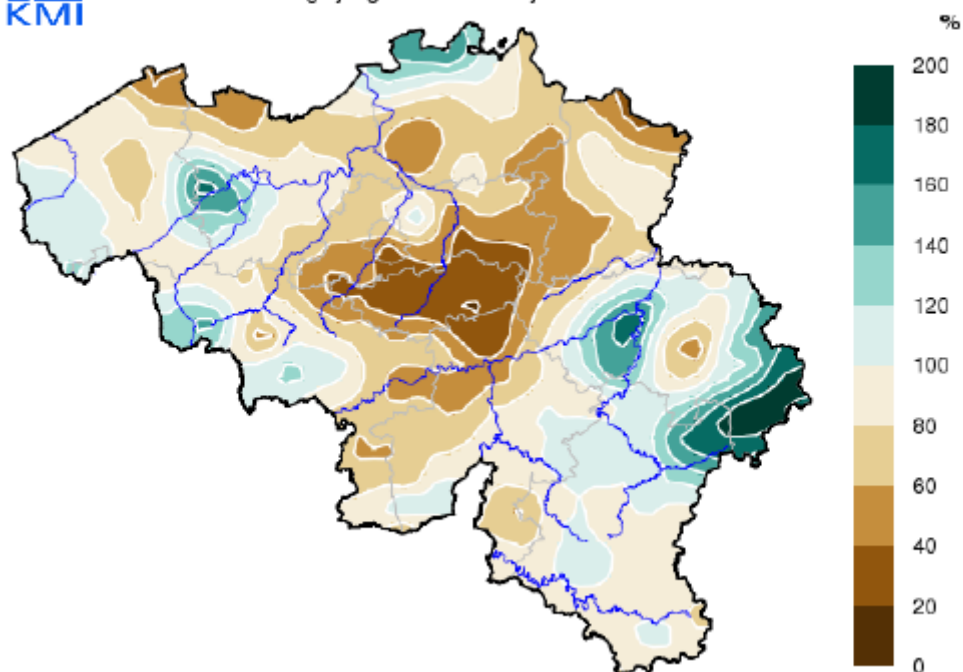
Figuur 8. Vergelijking van de windrichting in de maand mei 2018 (rood) met deze van de overeenkomstige periode van de 12 voorgaande maanden. Gegevens gemeten op het VMM referentiestation T2M802.



Afwijking van de normaalwaarde van de gemiddelde temperatuur
gemiddelde mei 2018 in vergelijking met de maandelijkse normaalwaarde 1981-2010



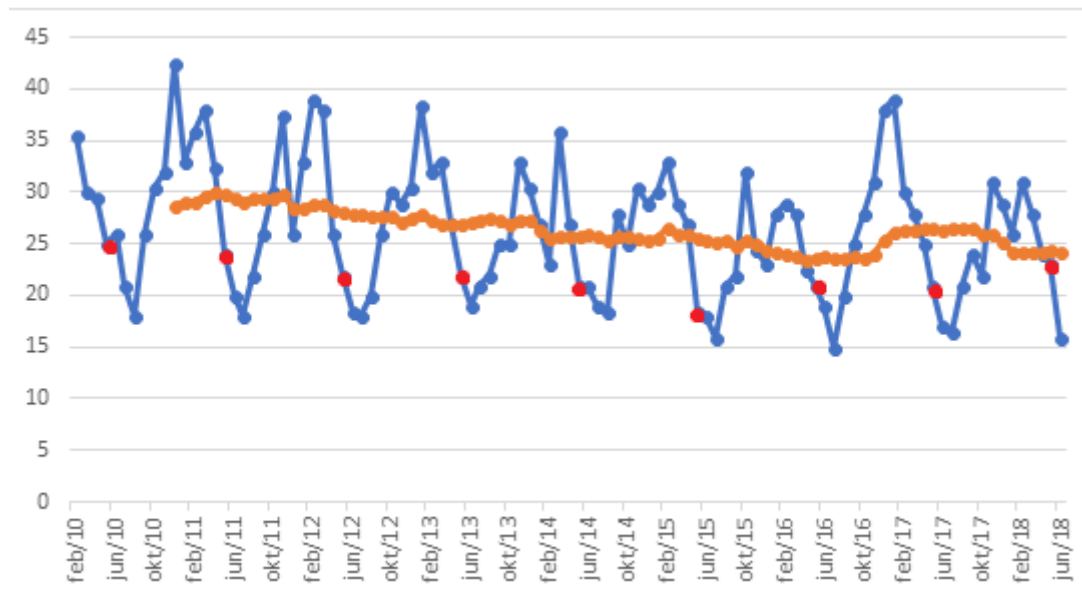
Verhouding tot de normaalwaarde neerslaghoeveelheid
totaal mei 2018 in vergelijking met de maandelijkse normaalwaarde 1981-2010



Figuur 9. Temperatuur en neerslag in mei 2018 vergeleken met referentieperiode 1981-2010.

2.7. Omrekening naar een indicatieve NO₂ jaarwaarde

Figuur 10 geeft weer hoe de NO₂ concentratie in de buitenlucht in Vlaanderen seizoenaal varieert over de periode van januari 2010 tot juni 2018. De seizoenale cyclus verloopt relatief regelmatig: hogere waarden in de winter worden afgewisseld met lagere zomerwaarden. Het voortschrijdende jaargemiddelde vertoont een lichte, maar consistent dalende trend.



Figuur 10. Lange termijnsvariatie van de NO₂ concentratie in Vlaanderen. Blauwe curve: maandgemiddelde NO₂ in Vlaanderen (mediaan van alle VMM referentiestations). Rode stippen: maandgemiddelde NO₂ in mei. Oranje curve: voortschrijdend gemiddelde over afgelopen 12 maanden van de maandgemiddelde NO₂ in Vlaanderen.

Om een duidelijkere interpretatie van de CurieuzeNeuzen resultaten toe te laten en om te kunnen toetsen aan de Europese (jaar)grenswaarde en de advieswaarde van de wereldgezondheidsorganisatie is het **aangewezen om het meimaand gemiddelde om te rekenen naar een indicatief jaargemiddelde**. Er zijn dus 2 redenen voor deze omrekening:

- Hoe langer de periode, hoe meer het effect van het weer wordt uitgemiddeld. Daarom is een jaargemiddelde minder onderhevig aan variatie door wisselende meteorologische condities dan een maandgemiddelde.
- EU en WGO grenswaarden worden gedefinieerd voor NO₂ jaargemiddelden (en niet maandgemiddelden)

De verticale afstand tussen de rode punten (het maandgemiddelde voor mei) en de oranje curve (het voortschrijdend 12-maandengemiddelde) in Figuur 10 varieert van jaar tot jaar. Zo sluit het gemiddelde voor mei 2018 dichterbij de oranje curve dan in andere jaren. De NO₂ concentraties zijn in mei 2018 dus relatief hoger dan in de jaren voordien omwille van specifieke meteorologische condities in mei 2018 (warmer dan gemiddeld, minder neerslag). Door de omrekening naar een indicatief jaargemiddelde wordt dit meteorologische effect opgevangen.

Om het mei-gemiddelde om te rekenen naar een indicatief jaargemiddelde gebruiken we de volledige dataset van alle VMM-NO₂-meetstations. De verhouding tussen het mei-gemiddelde en het gemiddelde van de afgelopen 12 maanden verschilt van plaats tot plaats, maar zoals verderop blijkt, is dit verschil relatief constant, waardoor het omrekenen naar een jaargemiddelde maar een beperkte onzekerheid toevoegt. De term 'indicatief' slaat dus op het feit dat dit geen echt gemeten jaargemiddelde is, maar een berekende waarde op basis van metingen op de officiële meetstations

van VMM. Een vergelijkbare aanpak werd eerder al toegepast in CurieuzeNeuzen 2016 en bij een VMM-meetcampagne in Gent⁵.

Figuur 11 vergelijkt de gemiddelde NO₂ waarde voor mei 2018 voor 52 referentiestations in het VMM meetnet met het gemiddelde van de maand juni 2017 tot en met mei 2018. Opnieuw werden drie statistische modellen toegepast om de systematische verschillen tussen beide datasets te beschrijven:

- Model A: Een constante absolute afwijking: $Y = A + X$
- Model B: Een constante relatieve afwijking: $Y = A * X$
- Model C: Een combinatie van beiden: $Y = A + B * X$

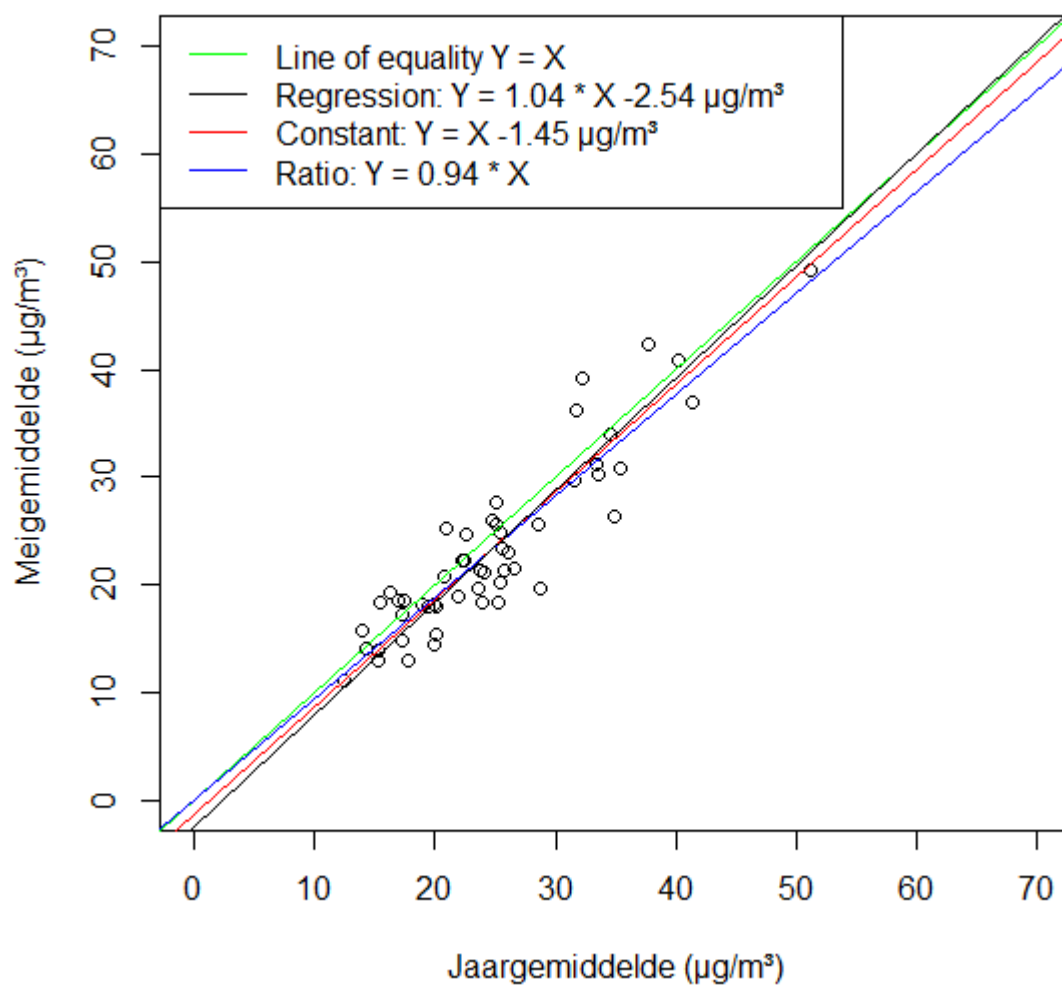
De regressie gebeurde op basis van orthogonale regressie (Deming regressie met variantie ratio 1). De onzekerheid op de model werd bepaald op basis van een jackknife analyse. Model A (constante afwijking) en model B (regressie) vertoonden een gelijkaardige onzekerheid, die aanmerkelijk lager was dan Model C (relatieve afwijking).

Model A werd vervolgens gebruikt voor de omrekening van de gekalibreerde NO₂ concentraties naar de indicatieve NO₂ jaarwaarden

$$C_{\text{jaarwaarde}} = C_{\text{gekalibreerd}} + 1.45 \mu\text{g m}^{-3}$$

Dit levert dus de finale dataset op met indicatieve jaargemiddelden. Concreet betekent dit dat het gemiddelde in mei 2018 $1.45 \mu\text{g m}^{-3}$ lager was dan het gemiddelde voor de periode juni 2017 tot en met mei 2018.

⁵ <https://stad.gent/natuur-milieu/wat-kan-u-zelf-doen/zorg-voor-gezonde-lucht/de-invloed-van-het-verkeer-op-de-gentse-luchtkwaliteit>



Figuur 11. Vergelijking van het maandgemiddelde NO₂ voor mei 2018 met het jaargemiddelde juni 2017 t.e.m. mei 2018 voor 52 VMM referentiestationen.

2.8. Kwaliteitscontrole

De gekalibreerde dataset bevat n=19155 geldige metingen. Voor gebruik in verdere statistische analyse en model/data vergelijking werden de voorwaarden verder verstrengd en aangescherpt:

- Een geldige meting dient voorhanden te zijn voor beide meetbuisjes
- De meetperiode is groter dan 24 dagen
- Er mag maar een beperkte afwijking zijn tussen de twee meetbuisjes (bepaald via outlier analyse)

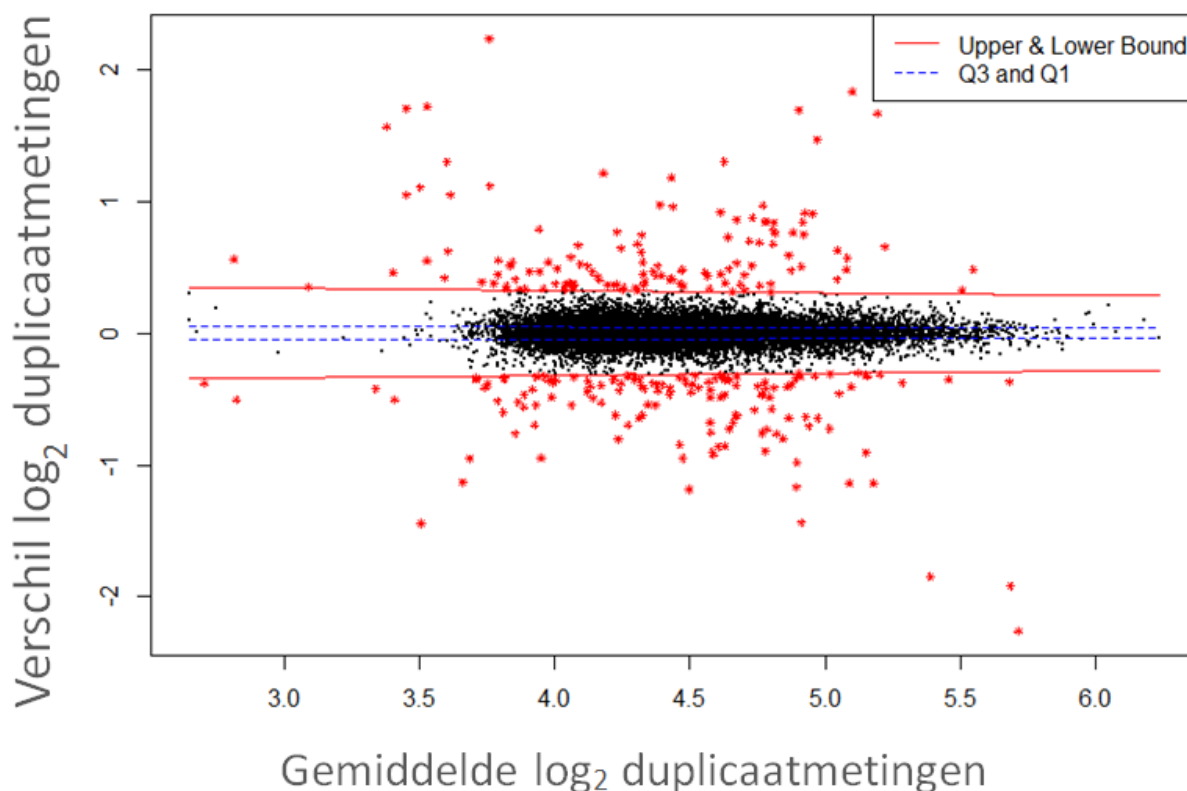
Parameter kwaliteit	Uitval		Resterend	
Aantal locaties met geldige meting			19155	95,8%
Slechts waarde voor 1 meetbuisje	904	4,5%	18251	91,3%
Te korte meetperiode (< 24 dagen)	147	0,7%	18104	90,5%
Meting op locatie zonder gebouwen	1	0,0%	18103	90,5%
Te grote duplicaat afwijking	260	1,3%	17843	89,2%

Tabel 3. Overzicht van meetlocaties dat weerhouden werd in de finale dataset gebruikt voor statistische analyse en model/data vergelijking.

Analyse duplicatafwijking

De meetopstelling had twee meetbuisjes en dus zijn alle metingen in duplicaat gebeurd. De verschillen tussen de duplicaten zijn bestudeerd aan de hand van kwantiel regressie om na te gaan welke metingen te ver uit elkaar liggen om betrouwbaar te zijn, zogenaamde “uitschieteranalyse” (**Figuur 12**). Voor deze techniek werden alle individuele jaarwaarden (2 per meetpunt) logaritmisch getransformeerd ($\log_2$). Van de getransformeerde waarden werd per meetpunt het gemiddelde $0.5 * (\log_2 A + \log_2 B)$ en het verschil ($\log_2 A - \log_2 B$) bepaald. De logaritmische transformatie is nodig omdat in de uitschieter analyse wordt gekeken naar de relatieve verhouding van de meetwaarden. Deze zijn zonder $\log_2$ transformatie niet symmetrisch verdeeld, wat het toepassen van technieken om uitschieters te identificeren bemoeilijkt.

Kwantiel regressie werd gebruikt om continu over het bereik van de gemiddelden het 25^e percentiel (Q1) en 75^e percentiel (Q3) van het verschil ($\log_2 A - \log_2 B$) te schatten. De interkwartielrange (IKR) is dan Q3-Q1, en de onderste en bovenste limietwaarden voor de uitschieter analyse zijn $Q1 - 3 * IKR$ en $Q3 + 3 * IKR$ respectievelijk. Afwijkingen buiten deze limietwaarden worden gezien als te groot en de bijhorende meetlocaties worden niet meegenomen in de verdere statistische analyse. Op deze manier worden 260 punten als uitschieter geïdentificeerd. Zoals te zien in **Figuur 15** zijn de resulterende limieten bijna constant over de range, overeenstemmend met een absoluut verschil in $\log_2(\text{jaarwaarde})$ van 0.3. Deze limieten corresponderen met een bijna constant relatief verschil tussen de niet-getransformeerde metingen van $2^{0.3} = 1.23$ (ofwel 23% relatief verschil) over de range.



Figuur 12. De detectie van uitschieters (rode punten) onder de jaarwaarden, door het plotten van het verschil en het gemiddelde van de log₂ getransformeerde concentraties voor elke duplicaatmeting. De boven blauwe streepjeslijnen tonen de interkwartielrange. De rode lijnen tonen de onderste en bovenste limietwaarden gebruikt voor de detectie van uitschieters.

Conclusie: 89.2% van de metingen (n=17843) doorstond de kwaliteitscontrole. Dit is de dataset die gebruikt werd in verdere statische analyse en model/data analyse.

2.9. Onzekerheid op het resultaat

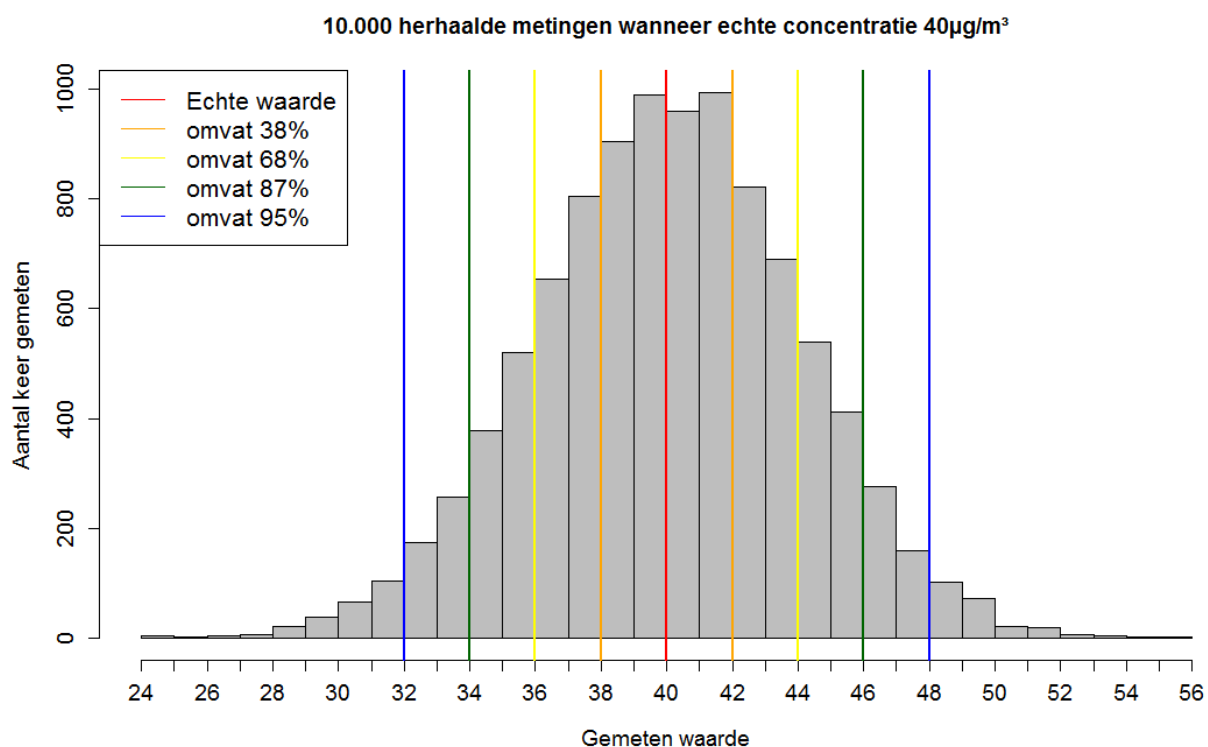
Geen enkele meting is 100% accuraat, er is altijd een bepaalde mate van onzekerheid op het meetresultaat. In deze paragraaf beschrijven we de onzekerheid van de gemeten meiwaarde en van de berekende indicatieve jaarwaarde ten opzichte van de officiële referentiemetingen van VMM⁶.

- *Gekalibreerde waarde (=meiwaarde).* De geschatte onzekerheid (1σ) op de correctieconstante voor de kalibratie (zie sectie 2.5) bij gebruik van 2 samplers is 2.2 μg m⁻³. Dit betekent dat de berekende meiwaarde op 2/3 van de meetpunten minder dan 2.2 μg m⁻³ zal verschillen van de waarde die gemeten zou zijn door een officieel meetstation dat er een maand lang gemeten had.

⁶ Strikt genomen hebben de referentiemetingen ook een onzekerheid, maar voor deze toepassing laten we die buiten beschouwing. De hier beschreven onzekerheden slaan dus enkel op de extra onzekerheid ten opzichte van de VMM referentiemetingen.

- **Indicatieve jaarwaarde.** De onzekerheid (1σ) is een combinatie van de correcties voor de kalibratie en voor de omzetting naar indicatieve jaarwaarde, en bedraagt $4.0 \mu\text{g m}^{-3}$. Dit betekent dat de indicatieve jaarwaarde op 2/3 van de meetpunten minder dan $4 \mu\text{g m}^{-3}$ zal verschillen van de waarde die gemeten zou zijn door een officieel meetstation dat er een 12 maanden lang gemeten had. Bij een minderheid van de meetpunten kan de fout groter zijn, dit heeft onder meer te maken met het feit dat de windrichting tijdens de meimaand afweek van het gemiddelde patroon over een volledig jaar (zie sectie 2.6). Ook uitzonderlijk meer of minder verkeer dan normaal (bv. door omleidingen of wegenwerken) kan er voor zorgen dat de afwijking ten opzichte van de echte jaarwaarde groter zal zijn. Dit effect is echter sterk afhankelijk van de situatie en valt onmogelijk te kwantificeren.

Figuur 13 illustreert grafisch wat deze onzekerheid inhoudt voor een typische meting en welke afwijkingen men kan verwachten. Stel dat men een Curieuzeneuzen meting 10.000 maal zou herhalen, dan geeft Figuur 13 de waarden weer die men zou bekomen. Bij een “echte” waarde van $40 \mu\text{g m}^{-3}$ is de kans 68% dat de meting tussen $36 \mu\text{g m}^{-3}$ en $44 \mu\text{g m}^{-3}$ zal liggen.



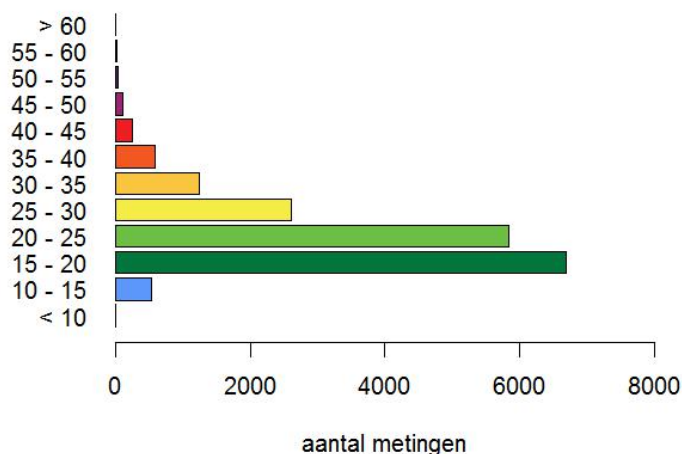
Figuur 13: Mogelijke resultaten (indicatieve jaarwaarde NO_2) van 10.000 herhaalde metingen met Curieuzeneuzen metingen op een plek waar een VMM meetstation een jaargemiddelde van $40 \mu\text{g m}^{-3}$ meet (rode lijn). De oranje, gele, groene en blauwe lijnen geven het bereik weer waartussen respectievelijk 38, 68, 87 en 95 percent van de herhaalde metingen zullen vallen.

Hoofdstuk 3: De resultaten

3.1. Algemeen overzicht Vlaanderen

3.1.1. De dataset voor Vlaanderen

Figuur 14 geeft de frequentieverdeling van de indicatieve NO₂ jaarwaarden uit de finale CurieuzeNeuzen dataset. Deze bestaat uit n = 17843 geldige indicatieve NO₂ jaarwaarden die de kwaliteitscontrole passeerden (89.2% van de meetlocaties; zie Hoofdstuk 2).

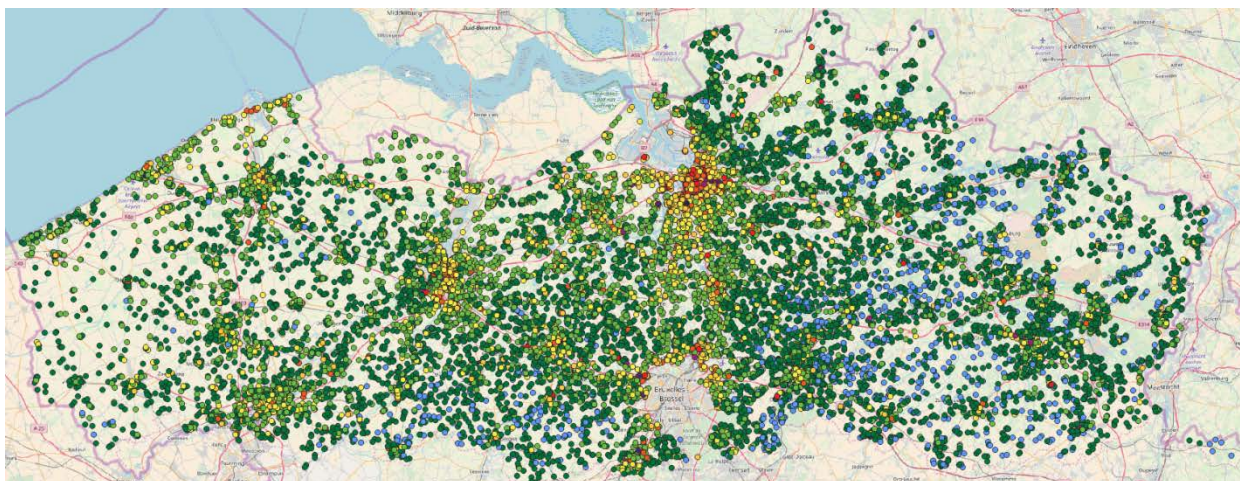


Figuur 14. Frequentieverdeling van de NO₂ concentraties uit het CurieuzeNeuzen Vlaanderen project (indicatieve NO₂ jaarwaarden). De waarden zijn opgedeeld in klassen per 5 µg m⁻³. De x-as geeft het aantal metingen in elke klasse. De kleurencode volgt deze van de CurieuzeNeuzen stippenkaart.

Het **gemiddelde van alle meetlocaties in Vlaanderen bedraagt 22.8 µg m⁻³**. De hoogste waarde in Vlaanderen bedraagt 75.3 µg m⁻³, en werd gemeten langsheen de N715 (Grote Baan) in Houthalen-Helchteren (op 60 meter van een kruispunt met verkeerslichten). De hoge waarden op en rond deze meetlocatie worden bevestigd door een tweede meetpunt aan de andere zijde van het kruispunt dat eveneens een zeer hoge waarde heeft (63.1 µg m⁻³). De laagste waarde in Vlaanderen bedraagt 10.9 µg m⁻³ en werd gemeten in het landelijke Remersdaal (Voeren), wat meteen ook het meest oostelijke meetpunt was van alle CurieuzeNeuzen meetlocaties (**Figuur 15**).



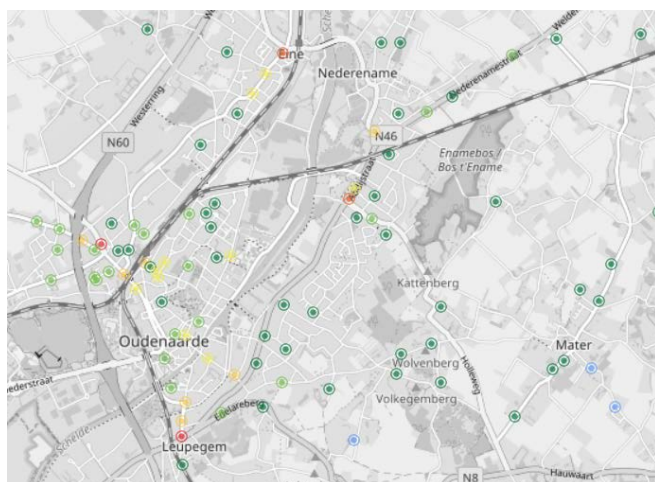
Figuur 15. De meetlocaties waar de hoogste en laagste NO₂ waarden werden gemeten in Vlaanderen. Links: Het kruispunt op de N715 (Grote Baan) in Houthalen-Helchteren. Rechts: Remersdaal, Voeren.



Figuur 16: De stippenkaart van Vlaanderen. Elk punt is een meetlocatie in het Curieuzeneuzen Vlaanderen project. De kleurcode van de stippen is dezelfde als in **Figuur 14**.

De NO₂ concentraties gemeten over Vlaanderen vertonen grote onderlinge verschillen. De hoogste gemeten NO₂ waarde bedraagt meer dan zeven maal de laagst gemeten NO₂ waarde. Deze grote spreiding is niet alleen kenmerkend voor Vlaanderen als geheel, maar is ook aanwezig op de kleinere ruimtelijke schaal van provincies, steden, en gemeenten. Zoals verder in meer detail besproken, wordt de NO₂ concentratie vooral door lokale (verkeers)emissies en de lokale straatconfiguratie bepaald.

De stippenkaart (**Figuur 16**) geeft een **goed beeld van hoe de NO₂-concentratie ruimtelijk sterk varieert over korte afstand**. Binnen eenzelfde dorp of stad observeren we zeer grote verschillen in NO₂-concentratie tussen straten, en soms zelfs binnen eenzelfde straat. **Figuur 17** geeft het voorbeeld van Oudenaarde, maar een vergelijkbare spreiding binnen eenzelfde gebied is kenmerkend voor alle andere dorpen en steden in Vlaanderen.



Figuur 17: Binnen eenzelfde stad of dorp kan de luchtkwaliteit sterk verschillen van straat tot straat, en soms zelfs binnen eenzelfde straat. In Oudenaarde varieert NO₂ waarde van 14 µg m⁻³ (lichtblauw) tot 42 µg m⁻³ (donker rood). Andere steden en dorpen vertonen een gelijkaardige spreiding in NO₂ concentraties.

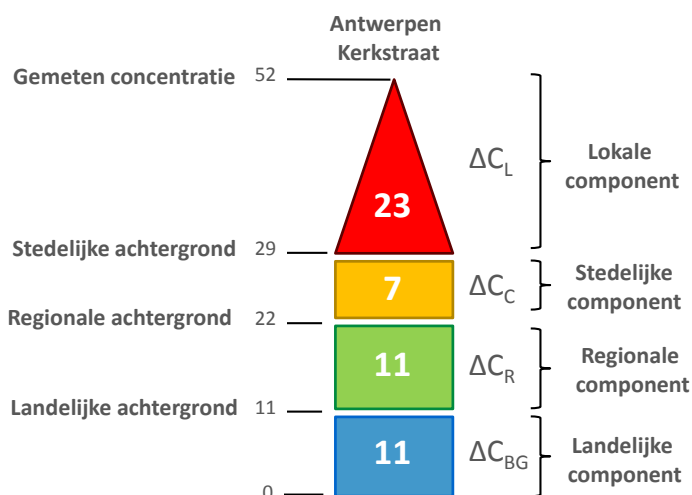
Ondanks de sterke ruimtelijke variabiliteit, zit er een duidelijke ruimtelijke patroon in de Curieuzeneuzen dataset. Wanneer de stippenkaart van Vlaanderen overschouwen, dan kunnen volgende kenmerkende omgevingen onderscheiden worden:

- “*Blauwe oases*”. Weinig bevolkte gebieden op het platteland met lage verkeersdruk en een zeer goede NO₂-concentratie (10-15 µg m⁻³).
- “*Groene woonstraten*”. Een groot deel van de Vlamingen woont op een locatie waar de NO₂-concentratie goed (15-20 µg m⁻³) tot vrij goed is (20 -25 µg m⁻³).
- “*Geel/oranje verstedelijking*”. Hierbij horen straten in centrumsteden met weinig tot matig verkeer en ook de verstedelijkte randen rondom Antwerpen en Gent. De NO₂-concentratie in deze straten varieert van gewoon (25-30 µg m⁻³) tot matig (30-35 µg m⁻³).
- “*Rode hotspots*” in het buitenstedelijk gebied. Dit zijn locaties in het centrum van kleine steden en dorpen met sterk verhoogde concentraties t.o.v. de omliggende straten. De NO₂-concentratie in deze straten varieert van matig (30 -35 µg m⁻³) tot ondermaats en soms zelfs slecht (40-45 µg m⁻³).
- “*Paarse stadsaders*” in het centrum van steden. Dit zijn straten met sterk verhoogde NO₂-concentratie t.o.v. de stedelijke achtergrond veelal door een combinatie van verkeer en street canyon effecten (45-55 µg m⁻³).
- “*Zwarte (kruis)punten*”. Dit zijn de locaties met de hoogste concentraties in Vlaanderen (50-75 µg m⁻³). Het zijn typisch drukke verkeersaders (tweevakswegen), omgeven door lintbebouwing en gelegen aan kruispunten (filevorming in de spits en ook stop-en-go verkeer door verkeerslichten gedurende de dag) of erg drukke straat canyons in grote steden.

Deze type-locaties worden verder in detail besproken in hoofdstuk 4.

3.1.2. Wat verklaart de grote ruimtelijke variatie in NO₂ concentraties?

De zoektocht naar welke belangrijke factoren de ruimtelijke verschillen in de NO₂ concentraties verklaren is een complexe uitdaging, waarvan slechts de eerste stappen in dit rapport wordt besproken. In de volgende maanden gaat het wetenschappelijk team een gedetailleerde statistische multivariate analyse uitvoeren, alsook een vergelijking van de CurieuzeNeuzen meetwaarden met computer simulaties van het ATMO-Street luchtkwaliteitsmodel. Dit zal een doorgedreven analyse opleveren van de belangrijke factoren die het histogram in **Figuur 14** en de stippenkaart in Figuur 19. bepalen. Kortom, het echte wetenschappelijke onderzoek kan nu pas volop starten, nu de CurieuzeNeuzen dataset bekend is.



Figuur 18. De NO₂ waarde gemeten op een welbepaalde locatie kan opgedeeld worden in 4 aparte componenten. Elk van deze componenten benadert een verschillend type van emissie.

Toch is het reeds mogelijk om een aantal grote lijnen uit te zetten. Een inzichtelijk hulpmiddel daarbij is het sterk vereenvoudigde conceptuele model in Figuur 18. Dit model wordt meerdere malen gebruikt in dit rapport om inzicht te geven in de processen die de NO₂ concentratie op een welbepaalde meetlocatie bepalen. In dit conceptueel model wordt de NO₂ concentratie (aangeduid met symbool C) in vier aparte componenten opgedeeld (Figuur 18).

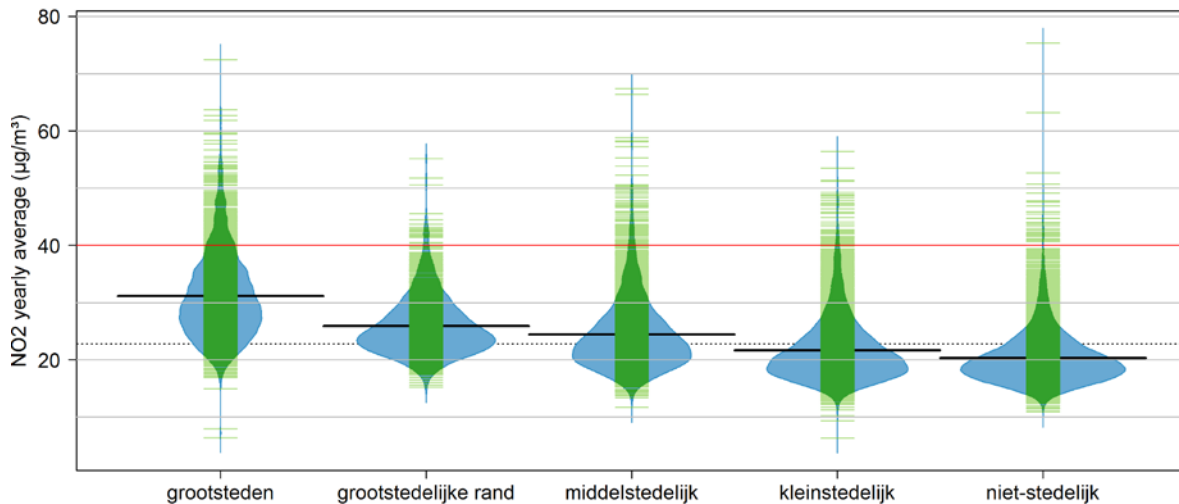
- **Een landelijke component ΔC_{BG} .** Deze wordt berekend als de laagste concentratie die gemeten werd in Vlaanderen. Deze landelijke component draagt op elke plaats in Vlaanderen bij aan de NO₂ concentraties, en wordt bepaald door de buitenlandse import, door natuurlijke NO_x bronnen, en deels door NO_x bronnen in Vlaanderen. Deze component is dus niet de concentratie die er in Vlaanderen zou gemeten worden in de veronderstelling dat alle NO_x-emissiebronnen zouden verdwijnen (een dergelijke zero-emissie concentratie kan niet afgeleid worden uit de CurieuzeNeuzen dataset).
- **Een regionale component ΔC_R .** Dit is de component die bovenop de landelijke component komt en in de ruime omgeving van het meetpunt de NO₂ concentraties mee bepaalt. Deze component wordt berekend uit de CurieuzeNeuzen data als de P10 (percentiel 10) van de gemeten NO₂ concentraties in een ruim gebied rond het meetpunt.
- **Een stedelijke component ΔC_C .** Dit is de component die bovenop de landelijke en de regionale componenten komt en in de volledige stad aanwezig is. Deze component wordt berekend uit de CurieuzeNeuzen data als de P10 (percentiel 10%) van de gemeten NO₂ concentraties in de stad.
- **Een lokale component ΔC_L** veroorzaakt door lokale emissies in de straat en de gebouwenconfiguratie van de straat. Daarnaast spelen ook nog de emissies in naburige straten een rol. Dit is de bijdrage die de NO_x emissies van het lokale verkeer geven aan de totale NO₂ concentratie in de straat. Deze component wordt berekend als $\Delta C_L = C - (\Delta C_C + \Delta C_R + \Delta C_{BG})$ waarbij C de gemeten concentratie in de straat is.

Door de componenten bij elkaar op te tellen kunnen verschillende karakteristieke concentraties gedefinieerd worden. In **Figuur 18** wordt dit geïllustreerd aan de hand van de NO₂ concentratie gemeten in de Kerkstraat in Antwerpen (een gelijkaardige decompositie kan gebeuren voor elke meetlocatie in Vlaanderen)

- Een **landelijke achtergrond** concentratie $C_{BG} = \Delta C_{BG}$.
- Een **regionale achtergrond** concentratie $C_R = C_{BG} + \Delta C_R = \Delta C_R + \Delta C_{BG}$. Dit is de NO₂ concentratie die bepaald wordt door de NO_x emissies in de ruime omgeving van Antwerpen.
- Een **stedelijke achtergrond** concentratie $C_C = C_R + \Delta C_C = \Delta C_C + \Delta C_R + \Delta C_{BG}$. Dit is – bij benadering – de NO₂ concentratie die je in de Kerkstraat in Antwerpen zou meten, wanneer er geen verkeer en dus geen NO_x emissies in de Kerkstraat en naburige straten zouden zijn, maar wel NO_x emissies in de rest van Vlaanderen en Antwerpen.
- De **totale concentratie** $C = C_C + \Delta C_L = \Delta C_L + \Delta C_C + \Delta C_R + \Delta C_{BG}$. Dit is de concentratie waar alle componenten samen de totale gemeten NO₂ concentratie bepalen.

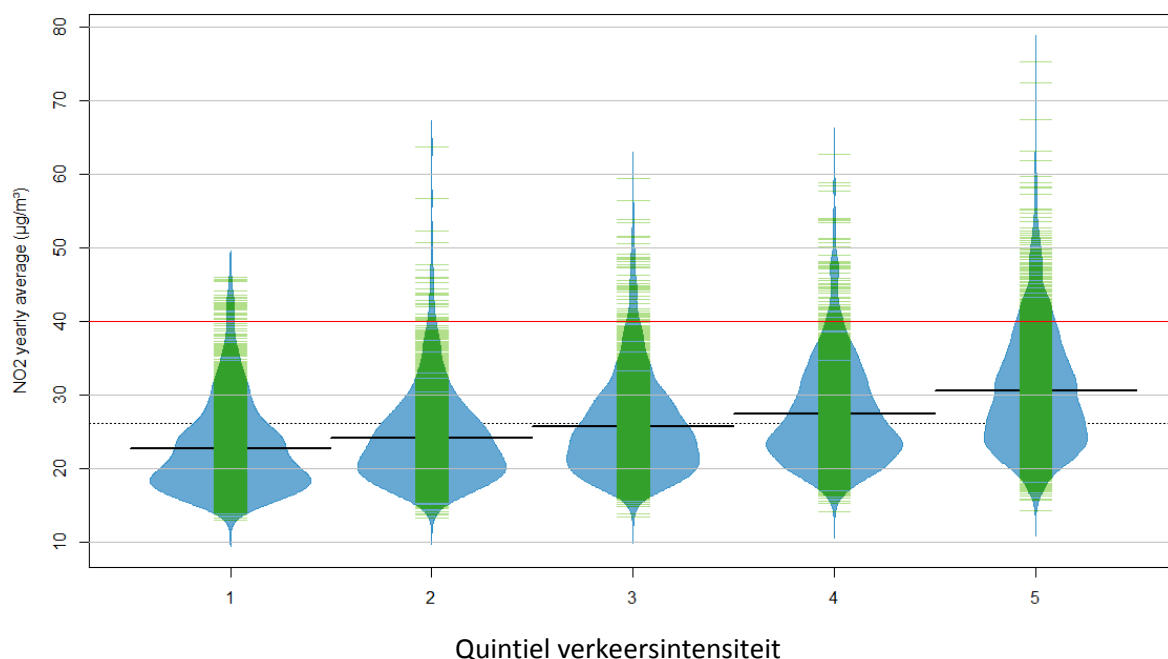
De door de mens veroorzaakte emissies van NO_x in Vlaanderen (door verkeer, huishoudens, industrie en landbouw) hebben vooral invloed op het deel bestaande uit ΔC_L , ΔC_C en ΔC_R . Op de landelijke component ΔC_{BG} is er naast een invloed uit Vlaanderen ook een invloed uit het buitenland. De bijdrage van buitenlandse NO_x emissies op de landelijke achtergrondconcentraties kunnen we via de CurieuzeNeuzen data echter niet kwantificeren. We zullen ons dus vooral focussen op de factoren die de componenten ΔC_L , ΔC_C en ΔC_R beïnvloeden. Er is daarbij een belangrijk verschil tussen de lokale component ΔC_L aan de ene kant, en de regionale ΔC_R en stedelijke ΔC_C componenten aan de andere kant.

De regionale ΔC_R en stedelijke ΔC_C componenten worden sterk beïnvloed door de graad van verstedelijking. Hoe meer verstedelijkt een welbepaalde locatie is, hoe groter de bevolkingsdichtheid is, in veel gevallen is er meer industrie en is de verkeersdruk hoger. Al deze factoren veroorzaken samen meer NO_x emissies per oppervlakte eenheid, wat resulteert in een grotere achtergrondconcentratie. Dit blijkt ook uit de CurieuzeNeuzen dataset (**Figuur 19**). In meer verstedelijkte gebieden stijgen de gemiddelde concentraties (die als indicatieve maat kunnen genomen worden voor de achtergrond concentraties).



Figuur 19. Overzicht van de indicatieve NO_2 jaarwaarden opgedeeld volgens graad van verstedelijking. Grootsteden = Antwerpen, Gent. Grootstedelijke rand = Gemeenten rond Antwerpen, Gent. Middelstedelijk = centrumsteden en stedelijk gebied rond het Brussels Gewest. Kleinstedelijk = provinciale steden en hun randgemeenten, structuurondersteunende steden. Niet-stedelijk = overgangsgebied en platteland. Blauw: frequentieverdeling van de data. Groene streepjes: individuele meetwaarden. Zwarte lijn = provinciaal gemiddelde. Stippellijn: algemeen gemiddelde. Rode lijn: aantal overschrijdingen van de EU grenswaarde ($40 \mu\text{g m}^{-3}$).

De lokale component ΔC_L wordt sterk beïnvloed door het verkeer in de straat. Dit omvat de zowel de gemiddelde verkeersdichtheid (drukker verkeer geeft hogere emissies), de gebouwenconfiguratie van de straat (street canyon effect), alsook de doorstroming van het verkeer (stop-en-go verkeer geeft hogere emissies). Drukker verkeer, aaneengesloten bebouwing en een slechte doorstroming resulteren in een grotere ΔC_L waarde. Ook dit is te zien in de CurieuzeNeuzen dataset (**Figuur 20**). In straten waarvoor een inschatting van de verkeersintensiteit beschikbaar is (op basis van de VVC-dataset verkeersstromen 2014 Vlaanderen), zien we ook stijging van de concentraties met de geschatte verkeersintensiteit.



Figuur 20. Overzicht van de indicatieve NO₂ jaarwaarden voor meetlocaties gecategoriseerd als “street canyons” (op basis van de gesloten geometrie van de straat). De data is opgedeeld volgens verkeersintensiteit in quintielen, zijnde de fractie tussen de laagste en de 20^{ste} percentiel, de 20^{ste} en de 40^{ste} percentiel, enz.

3.1.3. Overschrijding grenswaarden

Bij de inschatting van de gezondheidseffecten wordt de gemeten NO₂ concentraties vergeleken met bepaalde referentiewaarden. Daarbij zijn twee waarden van bijzonder belang. De Wereldgezondheidsorganisatie (WGO) hanteert 20 µg m⁻³ als “drempelwaarde”⁷ (vanaf deze waarde stelt de WGO voor om de gezondheidsimpact - zoals vroegtijdige sterfte - te berekenen op populatieniveau). Daarnaast hanteert de WGO 40 µg m⁻³ als “advieswaarde”⁸ (dit is de waarde waarboven schadelijke gezondheidseffecten aantoonbaar zijn en waaronder de gezondheidseffecten op populatieniveau klein, maar niet uitgesloten, zijn). De waarde van 40 µg m⁻³ is ook de wettelijke grenswaarde zoals vastgelegd door Europese richtlijn 2008/50/EG. Voor veel polluenten is de WGO strenger dan Europa, maar voor het NO₂-jaargemiddelde is dit niet het geval. Deze twee referentiewaarden worden voortaan “WGO drempelwaarde” (20 µg m⁻³) en “EU/WGO grenswaarde” (40 µg m⁻³) genoemd in dit document.

⁷ “Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project. Recommendations for concentration-response functions for cost-benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide.” World Health Organization 2013

⁸ De huidige WGO advieswaarden dateren uit 2005. Omdat er sinds 2005 verschillende nieuwe studies zijn met nieuwe inzichten over de rol van luchtvervuiling op de gezondheid worden de advieswaarden momenteel door de WGO herzien. De verwachting is dat de WGO nieuwe advieswaarden (niet alleen voor NO₂ maar ook voor fijn stof en andere polluenten) zal publiceren tegen 2020.

Deze twee waarden zijn ook cruciale referentiewaarden in het recent voorgestelde Luchtbeleidsplan 2030 van de Vlaamse regering. Dit plan heeft als doelstelling om “op korte termijn de huidige Europese luchtkwaliteitsnormen en streefwaarden ter bescherming van de gezondheid zo snel mogelijk halen”. Dit impliceert dat we “overal in Vlaanderen” de EU/WGO grenswaarde van 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ zouden moeten respecteren in de nabije toekomst. Verder stelt het Luchtbeleidsplan 2030 zich als doel om tegen het jaar 2030 “om per gemeente het aantal mensen dat wordt blootgesteld aan een jaargemiddelde NO_2 -concentratie hoger dan 20 $\mu\text{g m}^{-3}$ te halveren ten opzichte van 2016”.

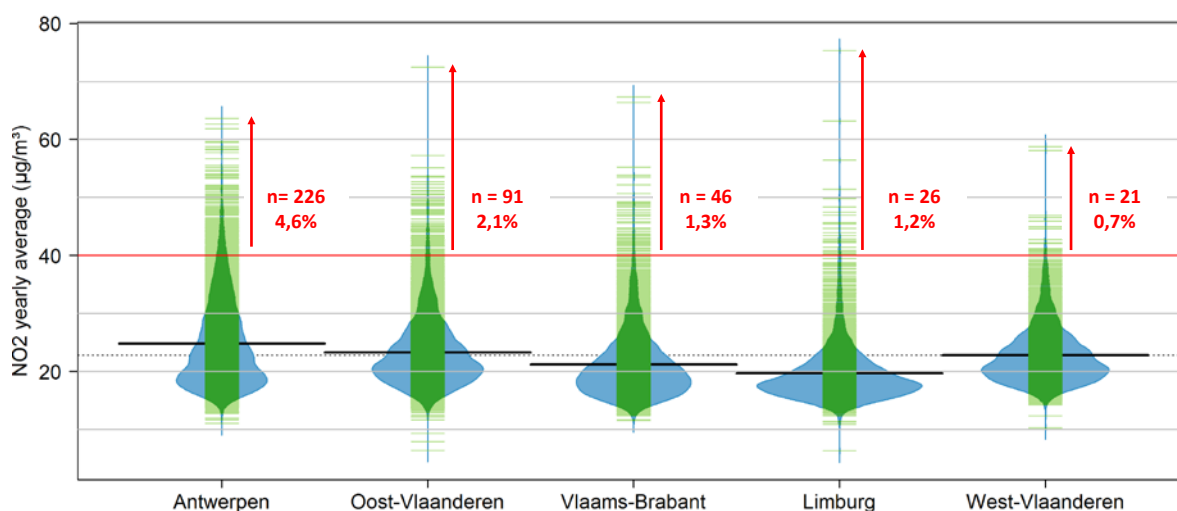
Tabel 4 geeft een overzicht van het aantal meetlocaties dat een jaargemiddelde NO_2 concentratie heeft boven een welbepaalde referentiewaarde. Zoals **Tabel 4** aangeeft **bevindt 2.3% van de CurieuzeNeuzen meetlocaties zich boven de EU/WGO grenswaarde van 40 $\mu\text{g m}^{-3}$** en heeft 60% van de CurieuzeNeuzen meetlocaties een concentratie boven de WGO drempelwaarde van 20 $\mu\text{g m}^{-3}$.

Grenswaarde NO_2	Aantal	Percentage
>70 $\mu\text{g m}^{-3}$	2	0.01%
>60 $\mu\text{g m}^{-3}$	8	0.04%
>50 $\mu\text{g m}^{-3}$	60	0.34%
>40 $\mu\text{g m}^{-3}$	410	2.29%
>30 $\mu\text{g m}^{-3}$	2236	12.50%
>20 $\mu\text{g m}^{-3}$	10677	59.69%
>10 $\mu\text{g m}^{-3}$	17887	100.00%

Tabel 4. Overzicht van het aantal en het percentage aan meetlocaties dat een jaargemiddelde NO_2 concentratie heeft boven een welbepaalde grenswaarde.

Wanneer we de CurieuzeNeuzen vergelijken met de referentiewaarden dan dient een belangrijke (en onopgeloste) vraag zich aan: Zijn de 20.000 CurieuzeNeuzen meetlocaties een representatief voor de Vlaamse bevolking als geheel? M.a.w. stel dat we op alle huizen in Vlaanderen een meetopstelling zouden plaatsten, zouden dan de resultaten (i.h.b. de frequentieverdeling van de NO₂ metingen zoals weergegeven in Figuur 3.1) dezelfde zijn? Aan de ene kant heeft CurieuzeNeuzen heel veel meetlocaties, wat de representativiteit bevordert (en dus hier heeft CurieuzeNeuzen een grote toegevoegde waarde t.o.v. kleinschaligere meetcampagnes). Aan de andere kant zijn er een aantal mogelijke processen (bv. een bias bij kandidaatstelling, een bias geïntroduceerd tijdens de selectie) die maken dat er toch een verschil kan optreden. De complexe vraag naar representativiteit kan nu nog niet beantwoord worden, en zal onderzocht worden in de volgende maanden (a.d.h.v. een doorgedreven model/data analyse).

3.2. Overzicht provincies



Figuur 21: Overzicht van dataset per provincie - indicatieve jaarwaarde NO₂. Blauw: frequentieverdeling van de data. Groene streepjes: individuele meetwaarden. Zwarte lijn = provinciaal gemiddelde. Rode pijlen: aantal overschrijdingen van de EU grenswaarde (40 µg m⁻³) en het percentage van meetpunten in overschrijding.

De grote spreiding die de NO₂-concentraties in Vlaanderen kenmerkt, vindt men ook terug in de datasets van de afzonderlijke provincies. In elke provincie zijn er meetlocaties met zowel zeer lage als zeer hoge NO₂ concentraties (**Tabel 5**). Het is opvallend dat de meetlocaties voor zowel de hoogste als de laagste waarde in Vlaanderen zich in de provincie Limburg bevinden. Dit illustreert duidelijk dat **het probleem van te hoge NO₂-concentraties een probleem is van geheel Vlaanderen, en niet beperkt is tot de verstedelijkte Vlaamse Ruit (of zich zou beperken tot de grote steden Antwerpen en Gent)**.

De provincie Antwerpen heeft de hoogste gemiddelde concentratie (24.8 µg m⁻³), gevolgd door Oost-Vlaanderen, West-Vlaanderen en Vlaams-Brabant, terwijl tenslotte Limburg de laagste gemiddelde concentratie heeft (19.7 µg m⁻³). De observatie dat **West-Vlaanderen een relatief hoog gemiddelde NO₂ concentratie heeft** (bv. hoger dan Vlaams-Brabant) is daarbij opvallend. Deze bijzondere positie van West-Vlaanderen komt nog meer tot uiting wanneer we naar de overschrijdingspercentages kijken (**Tabel 6**).

Provincie	Aantal meetpunten	Gemiddelde (µg m ⁻³)	Minimum (µg m ⁻³)	Maximum (µg m ⁻³)
West-Vlaanderen	2882	22.8	12.4	58.8
Oost-Vlaanderen	4401	23.3	11.7	72.5
Vlaams-Brabant	3544	21.2	11.5	67.5
Antwerpen	4922	24.8	11.1	63.7
Limburg	2138	19.7	10.9	75.3

Tabel 5: Overzicht van dataset per provincie - indicatie jaarwaarde NO₂. Basis statistische parameters.

De provincie Antwerpen alleen heeft 55% van de meetpunten in Vlaanderen die de EU grenswaarde van 40 µg m⁻³ overschrijdt (n=226). Dit is grotendeels te wijten aan de hoge stedelijke achtergrondconcentratie in de stad Antwerpen, waardoor bij een relatief kleine lokale verkeersbijdrage de norm overschreden wordt (zie sectie 3.3.2). Dit zorgt ervoor dat in 4.6% van de

meetlocaties in de provincie Antwerpen de EU/WGO grenswaarde wordt overschreden, wat meer dan twee maal zo hoog is als in de provincie Oost-Vlaanderen (overschrijding op 2.1% van de meetlocaties).

De provincie West-Vlaanderen heeft het minste aantal overschrijdingen van de EU/WGO grenswaarde (n = 21 overschrijdingen of 0.7% van de meetlocaties), op de voet gevolgd door Limburg (n = 26 overschrijdingen of 1.2% van de meetlocaties) en Vlaams-Brabant (n = 26 overschrijdingen of 1.2% van de meetlocaties). Als we evenwel toetsen aan de WGO drempelwaarde van $20 \mu\text{g m}^{-3}$, dan is het net West-Vlaanderen dat de hoogste waarde laat optekenen van alle provincies (overschrijding op 68.3% van de meetlocaties). Het histogram voor West-Vlaanderen wordt gekenmerkt door een verhoogd gemiddelde maar kleine spreiding (weinig naar beneden en naar boven).

Provincie	Aantal meetpunten >20	Percentage	Aantal meetpunten >40	Percentage
West-Vlaanderen	1968	68.3	21	0.7
Oost-Vlaanderen	2988	67.9	91	2.1
Vlaams-Brabant	1730	48.8	46	1.3
Antwerpen	3277	66.6	226	4.6
Limburg	714	33.4	26	1.2

Tabel 6: Overzicht van dataset per provincie - indicatie jaarwaarde NO₂. Aantal en percentage van de meetpunten die de drempelwaarde van $20 \mu\text{g m}^{-3}$ en de grenswaarde van $40 \mu\text{g m}^{-3}$ overschrijden.

3.3. Steden

3.3.1. Twaalf grootste steden

Een aparte data analyse werd doorgevoerd voor de 12 steden in Vlaanderen met een inwonersaantal groter dan 50.000 inwoners. Tabel A1 geeft de basis informatie weer over deze steden: inwonersaantal, oppervlakte en bevolkingsdichtheid. De stadsgrenzen zijn afgebakend op basis van de officiële afbakeningen van het grondgebied van de bestuurlijke eenheden in het Vlaamse Gewest (NIS codes). Deze grenzen zijn administratief bepaald en reflecteren niet altijd de variabelen die relevant zijn voor luchtkwaliteit en blootstelling (bv. urbanisatie, bevolkingsdichtheid). Zo omvat het grondgebied Antwerpen ten noorden van de stad een groot havengebied met een zeer lage bevolkingsdichtheid.

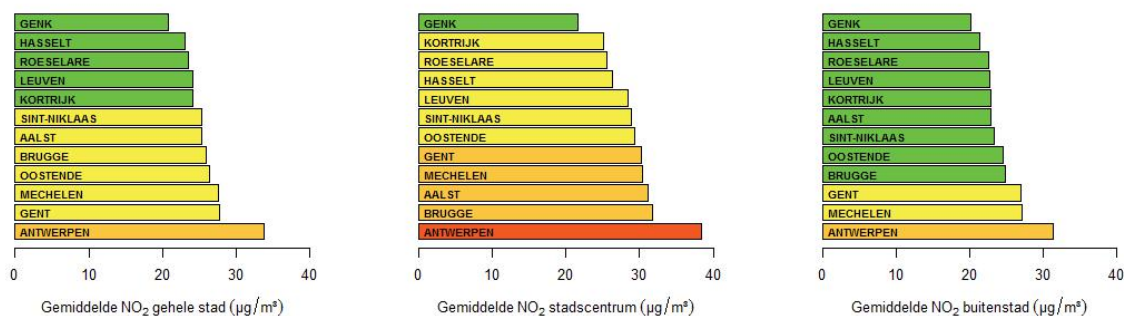
Om een beter zicht te krijgen op de NO₂-concentratie in het centrale stadsdeel werd elke stad opgesplitst in twee aparte delen op basis via een GIS applicatie (zie afbakening voor elke stad in sectie A.1)

- *Het stadscentrum*. Dit omvat het gebied binnen de ringwegen rond de binnenstad.
- *De buitenstad*. Dit omvat de rest van het grondgebied van de stad (dus het gebied dat niet tot het stadscentrum behoort).

Om binnenstad en buitenstad af te bakenen hebben we steeds gebruik gemaakt van de circulaire ringwegen rondom de stadscentra, voor details zie sectie A.1. In Antwerpen, Aalst, Brugge, Gent, Leuven, Mechelen, Oostende en Sint-Niklaas vormt de ringweg een logische afbakening van de binnenstad in termen van mobiliteit en soms ook bijhorend beleid (bv. toepassing lage-emissie zone in Antwerpen, circulatieplan in Gent). Kortrijk en Hasselt hebben beide een zeer kleine stadscentrum

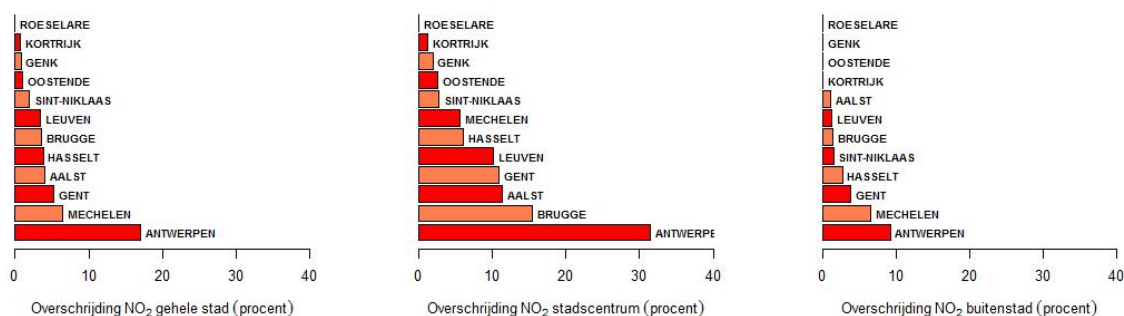
omgeven door een kleine ring, alsook een grote ringweg. In beide gevallen werd voor de grote ring als afbakening gekozen, omdat het stadscentrum binnen de kleine ring te weinig meetpunten bevatte voor betrouwbare statistiek. In Roeselare is er geen omsluitende ringweg die de stad omgeeft, tenzij de grote ring ver van de stad. Een keuze voor de grote ring als limiet voor de binnenstad zou niet in overeenstemmen met wat we in de andere steden als “binnenstad” beschouwen. Dus is er in Roeselare een afbakening gekozen op basis van de belangrijke verkeersaders die het kerngebied in Roeselare omgeven (zie sectie A.1).

Statistische parameters (gemiddelde, minimum en maximum concentratie; stedelijke achtergrondconcentratie; drempel waarde overschrijdingen) werden berekend voor de stad in zijn geheel (Tabel A2), alsook voor het stadscentrum (Tabel A3) en de buitenstad (Tabel A4). De stedelijke achtergrondconcentratie werd telkens berekend als de gemiddelde NO₂ concentratie van het P10-kwantiel van de NO₂ data per stad of per stadsdeel (zie sectie 3.1.2). De achterliggende redenering is dat de 10% laagste concentraties binnen een gebied verkeersarme meetlocaties, waarbij er een verwaarloosbare bijdrage is van lokale emissies in de straat ($\Delta C_L \sim 0$).



Figuur 22. Overzicht de gemiddelde NO₂ concentratie (µg m⁻³) in de gehele stad (links), het stadscentrum (midden) en de buitenstad (rechts) voor 12 steden in Vlaanderen.

Indien we de gehele oppervlakte van de steden beschouwen, dan wordt de **hoogste gemiddelde concentratie opgetekend in Antwerpen** (33.8 µg m⁻³). Daarna volgen Gent (27.7 µg m⁻³), Mechelen (27.6 µg m⁻³), Oostende (26.4 µg m⁻³) en Brugge (25.9 µg m⁻³). Genk heeft de laagste gemiddelde concentratie van de 12 steden (20.8 µg m⁻³). In Antwerpen wordt de EU/WGO grenswaarde (> 40 µg m⁻³) overschreden op 17.0% van alle meetlocaties, op ruime afstand gevolgd door Mechelen (6.4%), Gent (5.3%), Aalst (4%) en Hasselt (3.8%). De stad Roeselare staat laatste gerangschikt en telt binnen de dataset van CurieuzeNeuzen geen overschrijdingen van de EU/WGO grenswaarde.

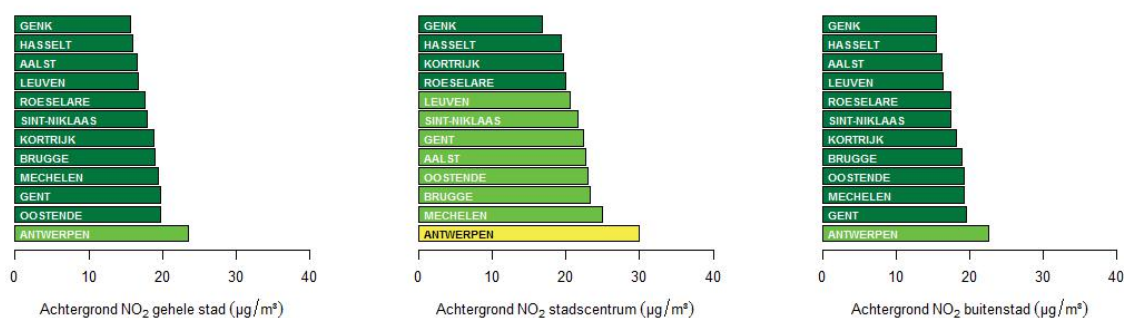


Figuur 23: Overzicht de overschrijdingen van de EU/WGO grenswaarde ($> 40 \mu\text{g m}^{-3}$) in de gehele stad (links), het stadscentrum (midden) en de buitenstad (rechts) voor 12 steden in Vlaanderen. De overschrijding wordt uitgedrukt als percentage van het totaal aantal meetlocaties.

Indien we enkel naar het stadscentrum kijken, dan krijgen we (soms) een ander beeld dan wanneer we de gehele stad bekijken. De stadscentra vertonen steeds een hogere concentratie dan de buitenstad of de stad als geheel. **De hoogste gemiddelde concentratie in een stadscentrum wordt nog steeds opgetekend in Antwerpen** ($38.4 \mu\text{g m}^{-3}$). Deze waarde ligt maar net beneden de EU grenswaarde, wat zich weerspiegelt in het groter aantal overschrijdingen: op 31.5% van de meetlocaties binnen de Singel in Antwerpen wordt de EU/WGO grenswaarde overschreden. Brugge ($31.7 \mu\text{g m}^{-3}$) en Aalst ($31.2 \mu\text{g m}^{-3}$) worden gekenmerkt door verhoogde gemiddelde concentraties in stadscentrum, wat gepaard gaat met een relatief groot aantal overschrijdingen van de EU/WGO grenswaarde (Brugge: 15.4% en Aalst 11.4%). Opvallend is dat Mechelen wordt gekenmerkt door relatief minder overschrijdingen in het stadcentrum (11.4%; 7^{de} ranking van alle steden) maar een relatief groot aantal overschrijdingen in de buitenstad (6.6%; 2^{de} ranking van alle steden). Ook in Gent is de concentratie in de binnenstad ($30.2 \mu\text{g m}^{-3}$) relatief weinig verhoogd is t.o.v. de buitenstad ($27.0 \mu\text{g m}^{-3}$). Gent staat 5^{de} gerankt wat betreft de gemiddelde concentratie in de binnenstad, en op de derde plaats wat betreft de gemiddelde concentratie in de buitenstad.

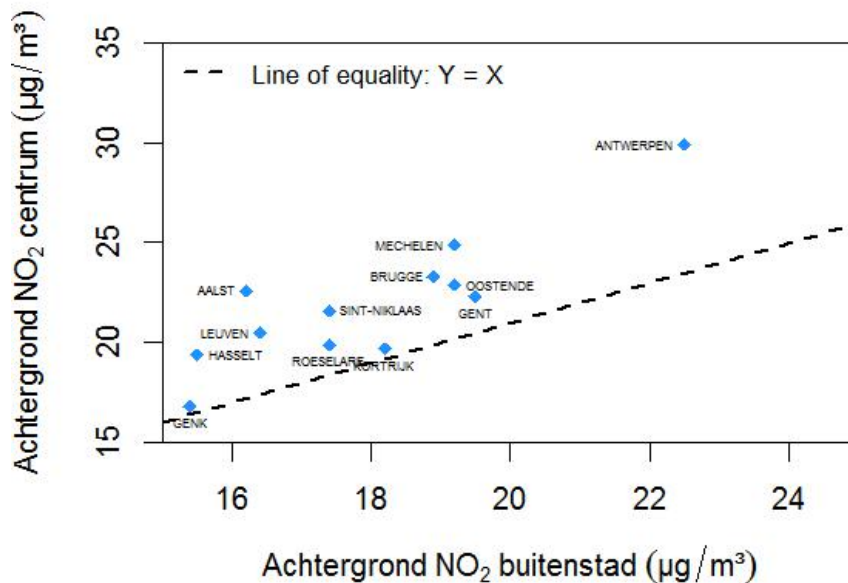
3.3.2. Achtergrondconcentraties

De achtergrondconcentratie in de buitenstad varieert relatief weinig tussen de Vlaamse steden, van $15.4 \mu\text{g m}^{-3}$ in Genk tot $19.5 \mu\text{g m}^{-3}$ Gent. De verkeersvrije tot verkeersluwe locaties in de buitensteden hebben dus steeds een NO_2 -concentratie $< 20 \mu\text{g m}^{-3}$. De uitzondering is Antwerpen, waar de achtergrondconcentratie in de buitenstad stijgt tot $22.5 \mu\text{g m}^{-3}$, wat verklaard kan worden door een verhoogde urbanisatiegraad, de aanwezigheid van sterke lokale emissiebronnen door wegverkeer (NO_x emissies van Singel en Ring die uitwaaiëren over de buitenstad) en de nabijheid van de haven (zowel industriële emissies als emissies door scheepvaart).



Figuur 24: Overzicht de achtergrond concentraties ($\mu\text{g m}^{-3}$) in de gehele stad (links), het stadscentrum (midden) en de buitenstad (rechts) voor 12 steden in Vlaanderen.

De achtergrondconcentraties in de binnenstad vertonen grotere verschillen van stad tot stad. Dit impliceert dat de NO_2 -concentratie in een verkeersvrij gebied in de binnenstad sterk afhankelijk is van stad tot stad. Antwerpen heeft de hoogste achtergrondconcentratie ($29.9 \mu\text{g m}^{-3}$) gevolgd door Mechelen ($24.9 \mu\text{g m}^{-3}$). Genk heeft wederom de laagste achtergrondconcentratie in de binnenstad ($16.8 \mu\text{g m}^{-3}$). Het is opvallend dat de hoogste binnenstedelijke achtergrondconcentratie (Antwerpen) bijna dubbel zo hoog als de laagste (Genk).



Figuur 25. Plot van de achtergrond concentraties in de buitenstad versus de achtergrond concentraties in de binnenstad. De stippellijn geeft de 1:1 lijn weer.

In alle 12 steden is de achtergrondconcentraties in de binnenstad steeds groter dan de buitenstad (**Figuur 25**). Maar het verschil in achtergrondconcentratie tussen binnenstad en buitenstad vertoont opvallende verschillen tussen de steden.

De steden Antwerpen, Mechelen en Aalst vertonen een groot verschil in achtergrondconcentratie tussen binnenstad en buitenstad (**Figuur 25**).

De steden Kortrijk en Genk daarentegen vertonen amper een verschil in achtergrondconcentratie tussen binnenstad en buitenstad. Dit is deels te verklaren door de specifieke afbakening van de binnenstad in deze twee steden. De ringweg ligt verder van het centrum af, zodat de binnenstad zich over een uitgebreid uitstrekt (in de andere 10 steden is de binnenstad compacter afgebakend). Ook Roeselare en Gent vertonen een relatief klein verschil in achtergrondconcentratie tussen binnenstad en buitenstad. De mate van verstedelijking in binnen-en buitenstad spelen vrijwel zeker een rol in de waargenomen trends.

Voor de Gentse situatie springt in het oog, gezien het toch om een relatief grote stad gaat met een compacte binnenstad (waarbij men verhoogde concentraties verwacht door het “pollution dome” effect – zie sectie 3.3.4). De verlaagde NO₂ concentraties in de Gentse binnenstad zijn evenwel consistent met recent NO₂ metingen door VMM, waarbij sterke reducties in NO₂ concentraties in de Gentse binnenstad zijn waargenomen, na invoering van het stedelijk circulatieplan⁹.

3.3.3. Hoge verkeersimpact index in steden

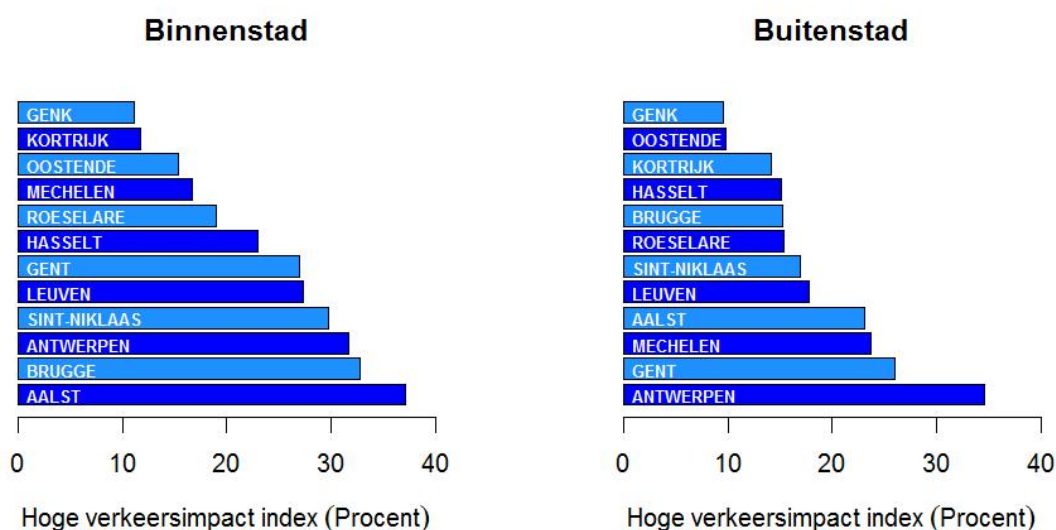
De totale concentraties op een welbepaalde meetlocatie vertellen *an sich* weinig over de impact van het lokale verkeer op de luchtkwaliteit. Bij het analyseren van de lokale verkeersimpact dient men rekening te houden met de stedelijke achtergrondconcentratie. Een meetpunt met een hoge

⁹ https://klimaat.stad.gent/sites/default/files/nota_circulatieplangent_3.pdf

stedelijke achtergrond C_R maar met een lage lokale impact ΔC_L kan een hogere totale concentratie hebben dan een meetlocatie met een lage stedelijke achtergrond C_R en een grote lokale bijdrage ΔC_L .

Een straat met hoge verkeersimpact definiëren we als een straat waar de NO_2 hoog boven het achtergrondniveau accumuleert, en dus meetlocatie in een dergelijke straat heeft dus per definitie een grote lokale bijdrage ΔC_L . Dit is doorgaans het resultaat van intens verkeer in combinatie met een specifiek ingesloten geometrie van de straat (street canyon).

We hebben voor alle steden het aantal meetpunten gekwantificeerd waarvoor $\Delta C_L > 10 \mu g m^{-3}$. Dit zijn dus locaties de totale concentratie meer dan $10 \mu g m^{-3}$ hoger is dan de stedelijke achtergrond. Het percentage aan meetpunten dat voldoet aan dit criterium vormt dan de HVI (Hoge Verkeersimpact Index). Deze berekening van de HVI gebeurde apart voor de binnenstad als de buitenstad en een ranking van steden werd opgemaakt (**Figuur 26**). De robuustheid van de ranking werd geverifieerd door de drempelwaarde voor de HVI te variëren van -20% ($8 \mu g m^{-3}$) tot +20% ($12 \mu g m^{-3}$) – zie Figuur Annex 2.



Figuur 26. De HVI index toont het percentage van de meetlocaties die een hoge verkeersimpact op de luchtkwaliteit hebben ($\Delta C_L > 10 \mu g m^{-3}$). Data voor zowel de binnenstad (links) als de buitenstad (rechts) voor 12 steden in Vlaanderen.

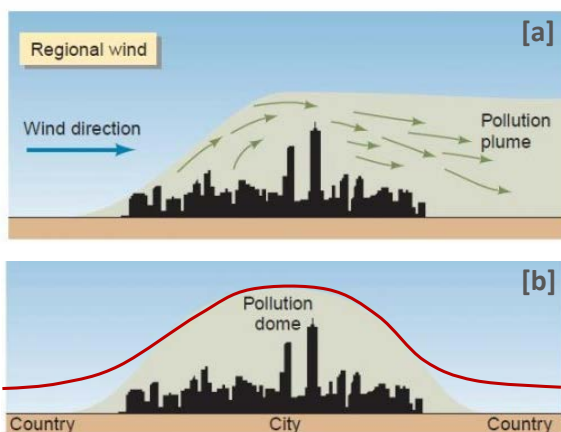
Dit geeft een opmerkelijk resultaat. Daar waar Antwerpen met voorsprong de hoogste gemiddelde concentratie heeft van alle steden in de binnenstad, staat het niet op de eerste plaats in de HVI ranking. De stad Aalst heeft het meeste meetlocaties met hoge verkeersimpact in de binnenstad (37.1%), gevolgd door Brugge (32.7%), Antwerpen (31.7%) en Sint-Niklaas (29.0%). Leuven (27.3%) en Gent (27.0%) hebben een gelijkaardige HVI index.

De HVI is louter gedefinieerd op basis van een sterke lokale verhoging van de NO_2 concentratie in de straat. De index geeft geen oorzaken, en maakt geen onderscheid of deze verhoging eerder door verkeersintensiteit komt dan wel dat ze door de straatgeometrie gedreven wordt. Vrijwel zeker spelen beide aspecten een belangrijke rol.

De steden Gent en Leuven hebben opmerkelijk lagere HVI. Ook het verschil tussen binnenstad en buitenstad in Antwerpen is opmerkelijk, waarbij de binnenstad het relatief beter doet dan de buitenstad.

3.3.4. Het “pollution dome” effect

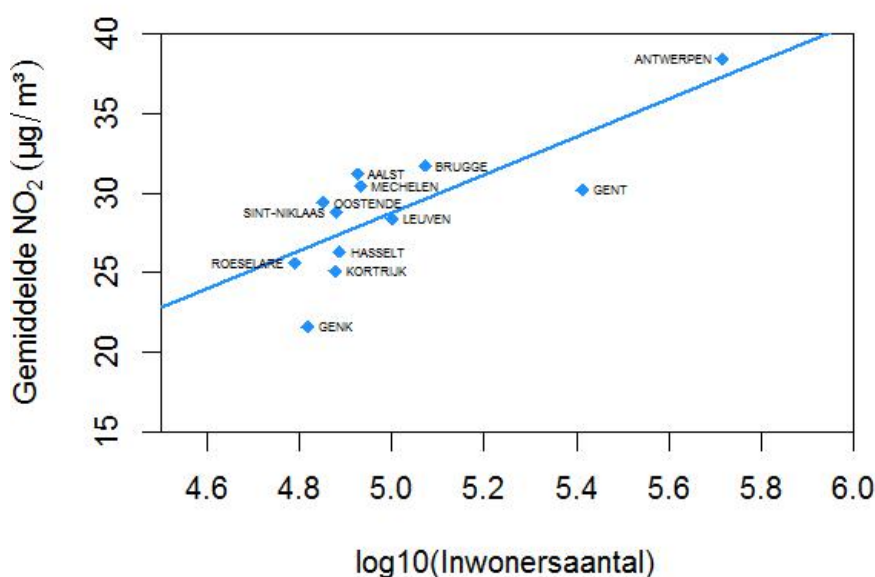
Kunnen we de opmerkelijke verschillen die we zien tussen steden in de gemiddelde NO_2 concentraties verklaren? Een belangrijk concept dat daarbij kan helpen is het “pollution dome” model. Steden worden typisch gekenmerkt door een hoge bevolkingsdichtheid (hoge huishoudelijke emissies), hoge verkeersdrukte (hoge emissies gerelateerd aan wegverkeer) en intense economische activiteit (hoge industriële emissies). In steden zijn de emissies (NO_x en andere stoffen) per oppervlakte-eenheid hoog. De luchtverontreiniging wordt door de wind afgevoerd en verdund. De balans tussen lokale productie en afvoer door wind maakt dat luchtvervuiling zich opstapelt boven steden. Het vormt als het ware een koepel van luchtvervuiling of “pollution dome” (die enigszins vergelijkbaar is met het hitte eiland effect). Hoe groter de stad, hoe moeilijker de afvoer, waardoor de concentraties zich dus meer opstapelen.



Figuur 27. Boven steden stapelt de luchtvervuiling zich op door het pollution dome principe. [a] Wanneer de wind uit een welbepaalde richting waait, krijg je een vervuilingspluim. [b] Over langere termijn waait de wind uit verschillende richtingen. Het lange-termijn gemiddelde geeft een koepel van luchtverontreiniging boven de stad. De concentraties zijn het hoogste in het centrum en dalen in de richting van de buitenstad.

Het “pollution dome” effect heeft 2 gevolgen, die ook zichtbaar zijn binnen de CurieuzeNeuzen dataset.

1. De achtergrondconcentratie in de binnenstad is hoger dan in de buitenstad.
2. De achtergrondconcentratie in het centrum van een stad stijgt naarmate met de stad groter wordt (zelfs indien de emissies per capita of per oppervlakte-eenheid constant blijven)



Figuur 28. Plot van de achtergrondconcentraties in de binnenstad versus de het inwonersaantal (op logaritmische schaal). De volle lijn geeft de regressielijn weer.

Het eerste effect is reeds hierboven besproken en bevestigd. In alle 12 steden is de achtergrond concentraties in de binnenstad zijn steeds groter dan de buitenstad (**Figuur 25**).

Het tweede effect blijkt ook uit de data. We kijken hierbij naar de binnenstedelijke achtergrondconcentraties in functie van het inwonersaantal (waarbij het inwonersaantal wordt gebruikt als een indicatieve maat voor de “grootte” van de stad). Dit gebeurt in **Figuur 28**. We zien een duidelijke stijging van de binnenstedelijke achtergrondconcentratie naarmate de stad groter wordt. Belangrijke afwijkingen van de trend zijn er in de steden Genk en Gent. Beide steden hebben relatief lage achtergrondconcentraties gezien de grootte van de stad.

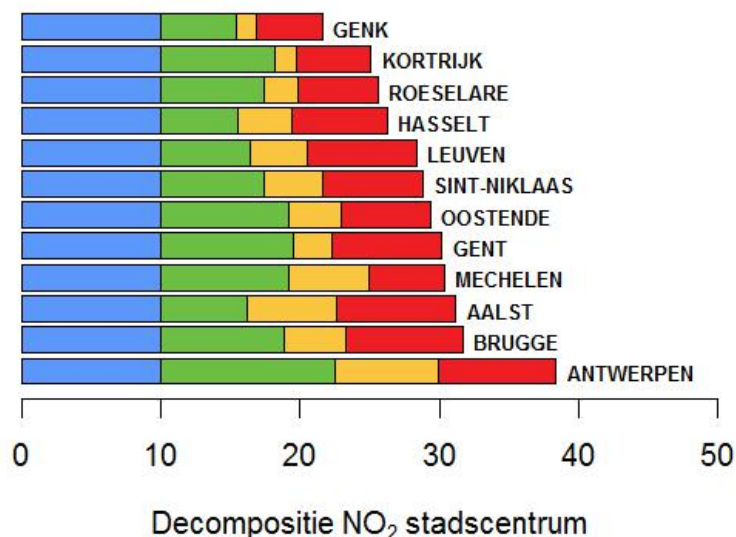
3.3.5. Decompositie

Het beter begrijpen van de complexe relatie tussen emissies (daar waar luchtkwaliteitsbeleid van de overheid op ingrijpt) en concentraties (dat wat gezondheidseffecten bepaalt) is uitermate belangrijk. Het is eerst en vooral cruciaal om in te zien dat er niet altijd een lineair 1 op 1 verband bestaat tussen emissies en concentraties (een misverstand dat vaak in de media opduikt). Het is niet omdat de NO_x emissies door wegverkeer met 10 % dalen in een welbepaalde straat dat ook de NO_2 concentratie in die straat zal dalen met eenzelfde 10 %.

Het conceptueel model voorgesteld in sectie 3.1.2 laat toe om op basis van de CurieuzeNeuzen dataset een eerste (benaderend) inzicht te krijgen in de relatie tussen emissies en concentraties in de 12 grootste Vlaamse steden. De gemiddelde concentratie in een “gemiddelde straat” in de stadskern kan opgedeeld in vier verschillende componenten:

- Een landelijke achtergrondconcentratie. Deze component wordt hier afgeschat als $C_{BG} \sim 10.9 \mu\text{g m}^{-3}$ (gebaseerd op de laagste concentratie gemeten in Vlaanderen).
- Een “regionale” component ΔC_R , berekend als de achtergrondconcentratie in de buitenstad (Tabel A4) verminderd met de nationale achtergrondconcentratie C_{BG} . De concentratie $C_{BG} + \Delta C_R$ is bij benadering de NO_2 concentratie die in de straat zou gemeten worden indien er geen emissies zouden gebeuren in binnenstad en buitenstad. De veronderstelling is dat de regionale component ΔC_R voornamelijk veroorzaakt wordt door emissies buiten stad en dus door NO_x die “de stad binnenwaait”.
- Een “stedelijke” component ΔC_C , berekend als het verschil tussen de achtergrondconcentratie in de binnenstad (Tabel A3) en de achtergrondconcentratie in de buitenstad (Tabel A4). De concentratie $C_{BG} + \Delta C_R + \Delta C_C$ is bij benadering de NO_2 concentratie die zou gemeten worden in de straat indien er geen emissies zouden gebeuren door lokaal verkeer in de straat. De veronderstelling is dat de stedelijke component ΔC_C veroorzaakt wordt door emissies binnen stad en dus door NO_x die “de straat binnenwaait” vanuit de rest van de stad.
- Een “lokale” component ΔC_L , berekend als het verschil tussen de gemiddelde concentratie in de binnenstad (Tabel A2) met de achtergrondconcentratie in de binnenstad (Tabel A3). De concentratie $C_{BG} + \Delta C_R + \Delta C_C + \Delta C_L$ is de werkelijk gemeten concentratie in een “gemiddelde straat” in de stad. De veronderstelling is dat de lokale component ΔC_L voornamelijk wordt veroorzaakt door emissies binnen de straat en dus in het bijzonder de bijdrage die het lokaal verkeer geeft aan de NO_2 concentratie in de straat.

De bovenstaande benadering is een eerste-orde benadering (zie Thunis, 2018¹⁰ voor de onderliggende assumpties en mogelijke deviaties). Ze is bedoeld om inzicht te verschaffen in het aandeel van lokale en stedelijke bijdragen (waar stedelijk beleid kan op ingrijpen) versus de andere bijdragen (waar stedelijk beleid kan op ingrijpen).



Figuur 29. Decompositie van de gemiddelde concentraties in de binnenstad van 12 steden in Vlaanderen a.d.h.v. de CurieuzeNeuzen data. Blauw= landelijke component; groen= regionale component; oranje=stedelijke component; rood= lokale component.

De NO₂ concentratie kan bijgevolg geschreven worden als

$$C_{2018} = C_{BG} + \Delta C_R + \Delta C_C + \Delta C_L$$

Figuur 29 toont deze opbouw van de gemiddelde concentratie voor de 12 grootste steden in Vlaanderen. De lokale bijdrage vrij gelijklopend is tussen steden. De verschillen tussen steden zit vooral in de opbouw van de regionale en stedelijke componenten. Met andere woorden, indien men de NO₂-concentratie in de binnenstad wil verbeteren moet het beleid niet alleen op de lokale component, maar ook op de regionale en stedelijke componenten inwerken.

De steden Antwerpen (11.6), Gent (8.6), Mechelen (8.3) en Oostende (8.3) vertonen de grootste regionale bijdragen ΔC_R . De steden Genk (4.5), Hasselt (4.6), Aalst (5.3) en Leuven (5.5) hebben de kleinste regionale bijdrage.

De steden Antwerpen (7.7) en Aalst (6.4) vertonen de grootste stedelijke bijdragen ΔC_C . Opvallend is de lage stedelijke component in Gent (2.8).

De steden Aalst (8.6), Antwerpen (8.5) en Brugge (8.4) vertonen de grootste lokale bijdragen ΔC_L van wegverkeer in de straat, wat overeenstemt met de positie van deze steden in de HVI (Hoge Verkeers Impact) ranking.

¹⁰ Thunis, P. (2018). "On the validity of the incremental approach to estimate the impact of cities on air quality". *Atmospheric Environment*, 173, 210-222.

Beleidsaanbeveling:

- Tot nu toe heeft het beleid rond stedelijke street canyons zich toegespitst op de grote steden Antwerpen en Gent. De CurieuzeNeuzen dataset toont aan het fenomeen zich niet beperkt tot deze twee grote steden. Ook vele centrumsteden hebben stedelijke hotspots, waarbij in sommige centrumsteden (Aalst, Brugge) de HVI in de binnenstad zelfs groter is dan in Antwerpen en Gent.
- Tot nu toe heeft het beleid voornamelijk toegespitst op de binnenstad (bv. LEZ en circulatieplannen zijn gericht op de binnenstad). De CurieuzeNeuzen dataset toont aan dat er ook in de buitenstad een hoge lokale verkeersimpact is op de luchtkwaliteit. Het aanpakken van deze problematiek in de buitenstad vereist dus specifieke aandacht en specifiek beleid.

Hoofdstuk 4: NO₂-concentraties in verschillende leefomgevingen

4.1. Indeling

Wanneer de stippenkaart van Vlaanderen overschouwen, dan kunnen volgende kenmerkende omgevingen onderscheiden worden:

- *Blauwe oases.* Weinig bevolkte gebieden op het platteland met lage verkeersdruk en een zeer goede NO₂-concentratie (10-15 µg m⁻³).
- *Groene woonstraten.* Een groot deel van de Vlamingen woont op een locatie waar de NO₂-concentratie goed (15-20 µg m⁻³) tot vrij goed is (20-25 µg m⁻³).
- *Gele centrumsteden en stadsranden.* Hierbij horen straten in centrumsteden met weinig tot matig verkeer en ook de verstedelijkte zone rondom Antwerpen. De NO₂-concentratie in deze straten varieert van gewoon (25-30 µg m⁻³) tot matig (30 -35 µg m⁻³).
- *Rode hotspots in dorpskernen en kleine steden.* Dit zijn locaties in het centrum van dorpskernen en kleine steden met sterk verhoogde concentraties t.o.v. de omliggende straten. De NO₂-concentratie in deze straten varieert van matig (30-35 µg m⁻³) tot ondermaats en soms zelfs slecht (40-45 µg m⁻³).
- *Paarse stadsaders.* Dit zijn locaties in het centrum van steden met sterk verhoogde concentraties t.o.v. de stedelijke achtergrond. De NO₂ concentratie in deze straten bereikt hoge waarden (45-55 µg m⁻³).
- *Zwarte (kruis)punten.* Dit zijn de locaties met de hoogste concentraties in Vlaanderen (50-75 µg m⁻³). Het zijn typisch drukke verkeersaders (tweevakswegen), omgeven door lintbebouwing en gelegen aan kruispunten (filevorming in de spits en ook stop-en-go verkeer door verkeerslichten gedurende de dag) of erg drukke straat canyons in grote steden.

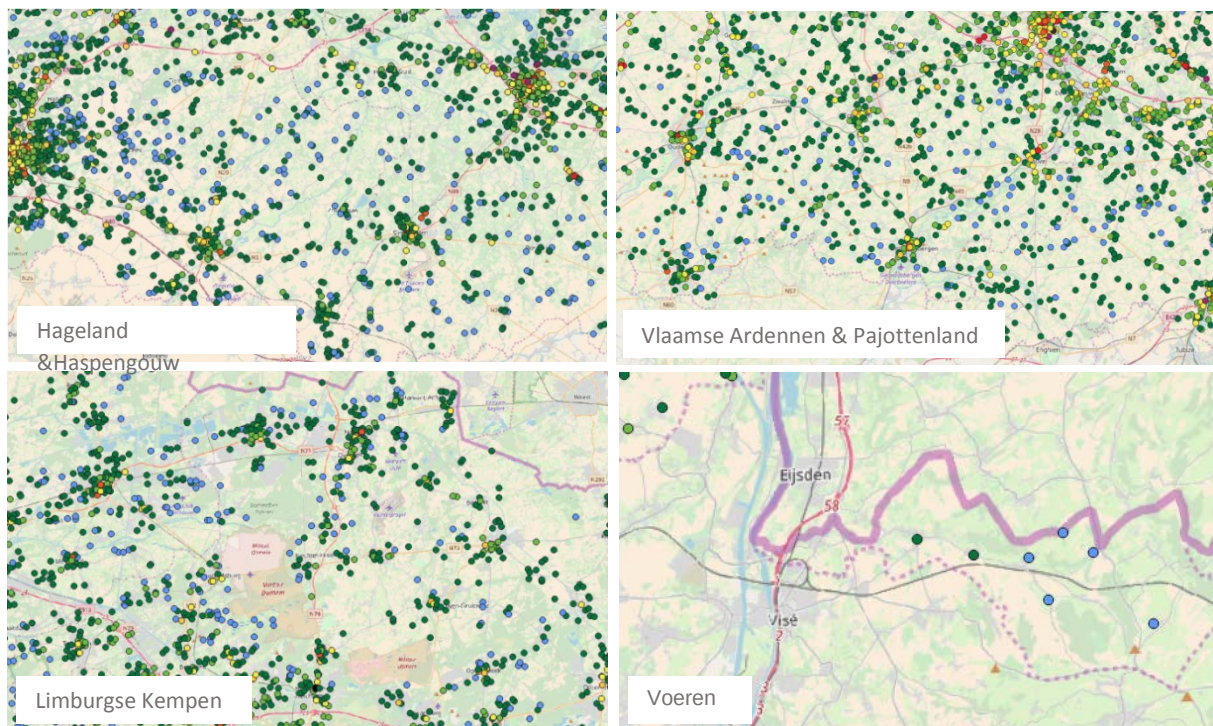
Het voorkomen van deze omgevingen in Vlaanderen wordt nu verder in detail besproken.

4.2. Blauwe oases

Blauwe oases zijn gebieden op het platteland met goede NO₂-concentratie (lichtblauwe stippen: 10-15 µg NO₂ m⁻³). Wanneer we de CurieuzeNeuzen stippenkaart bekijken, dan vallen van er vier gebieden op met een verhoogde densiteit aan lichtblauwe stippen:

- Hageland en Haspengouw
- Vlaamse Ardennen en Pajottenland
- Limburgse Kempen
- Voerstreek

Deze gebieden worden gekenmerkt met lage bevolkingsdichtheid, weinig verstedelijking, lage verkeersdruk, en relatief grote afstand tot snelwegen en steden (emissiebronnen). Zoals reeds eerder besproken bij het overzicht van de Provincies (sectie 3.2) is het ontbreken van een “blauwe oase” in West-Vlaanderen opmerkelijk.



Figuur 30: Overzicht van de streken in Vlaanderen met de laagste NO₂-concentraties.

4.3. Zwarte kruispunten

In elke provincie zijn er een aantal meetlocaties die een extreem hoge concentraties vertonen, waarbij de concentratie bovendien sterk uittorent t.o.v. andere waarden in de onmiddellijke omgeving (**Tabel 8**). We refereren naar deze meetlocaties met de nieuwe term “zwarte (kruis)punten”. Ze zijn niet beperkt tot een welbepaalde regio, maar komen verspreid voor over geheel Vlaanderen. Indien we deze meetlocaties nader bekijken, dan valt een duidelijk patroon op:

- ze bevinden zich typisch op brede tweebaanswegen (hoge emissies door druk verkeer)
- ze bevinden zich quasi altijd nabij een kruispunt (verhoogde emissies door stop-en-go verkeer nabij verkeerslichten of rotonde)
- de randen van de kruispunten zijn ingesloten door bebouwing of bomen (verminderde ventilatie en verhoogde accumulatie van luchtverontreiniging)

Een opmerkelijke en **belangrijke bevinding is dat deze zwarte kruispunten duidelijk verschillend zijn van de zogenaamde “stedelijke street canyons”** (zoals reeds besproken in sectie 3.3.3). Deze laatste zijn doorgaans nauwe straten in binnensteden met hoge verkeersdruk, waar de luchtverontreiniging sterk accumuleert door ingesloten bebouwing.



Figuur 31: Twee voorbeelden van zwarte kruispunten op de ringweg rond steden.

Ofschoon de meetlocaties geassocieerd met zwarte (kruis)punten meestal wel een street canyon karakter hebben, is dit niet uitermate uitgesproken. De bijhorende straten zijn meestal wel ingesloten door bebouwing, maar worden doorgaans niet echt ingeklemd door hoge (flat)gebouwen. Sommige zwarte kruispunten zijn zelfs verbazingwekkend open van karakter (zie **Figuur 33**; Hoefijzerlaan, Brugge). Daar waar stedelijke street canyons eerder smal zijn, hebben de rijwegen die uitgeven op zwarte kruispunten eerder een breed karakter (tweebaansweg).

Daarenboven zijn zwarte (kruis)punten zeker geen exclusief fenomeen van de steden. Een aantal van de zwarte (kruis)punten bevinden zich immers langs drukke gewestwegen in het buitengebied. De meetlocatie aan de N715 (Grote Baan) in Houthalen-Helchteren (op 60 meter van een kruispunt), waar de hoogste concentraties in Vlaanderen gemeten werden, is daar een illustratief voorbeeld van (zie **Figuur 34**).

Indien we kijken naar zwarte kruispunten die gelegen zijn in de nabijheid van steden, dan bevinden deze zich niet in de binnenstad, maar op drukke kruispunten op de ringweg rond de steden. De meetlocaties met twee hoogste waarden in West-Vlaanderen (Hoefijzerlaan, Brugge en Elisabethlaan, Oostende) zijn hier twee typische voorbeelden (**Figuur 33**). Andere voorbeelden worden gegeven in **Figuur 34**.

De zwarte kruispunten komen prominent naar voren binnen het CurieuzeNeuzen project. Ze zijn tot nu toe onder de radar gebleven, omdat het een relatief zeldzaam fenomeen is, dat pas gedetecteerd kan worden binnen een uitgebreide en fijnmazige ruimtelijke samplingscampagne zoals CurieuzeNeuzen.

Het identificeren en inventariseren van de zwarte kruispunten is van belang voor het luchtkwaliteitsbeleid op stedelijk en Vlaams niveau. Een zwart kruispunt heeft een sterke verhoogde concentratie t.o.v. de onmiddellijke omgeving. Ze kunnen dus niet eenduidig gedefinieerd worden a.d.h.v. van een welbepaalde drempelconcentratie. Het aantal >50 overschrijdingen wordt hier louter gebruikt als een indicatieve maat voor het voorkomen van zwarte kruispunten (**Tabel 8**). Dit is slechts een eerste benadering, bij gebrek aan een beter criterium. Verder statistisch onderzoek en model/data vergelijking binnen CurieuzeNeuzen project zal toelaten om beter inzicht te krijgen in

het voorkomen van zwarte kruispunten en factoren die de NO₂-concentratie luchtkwaliteit op deze locaties beïnvloeden (kwantitatief maken van het relatief belang van verkeersdruk, doorstroming, en openheid/ventilatie).

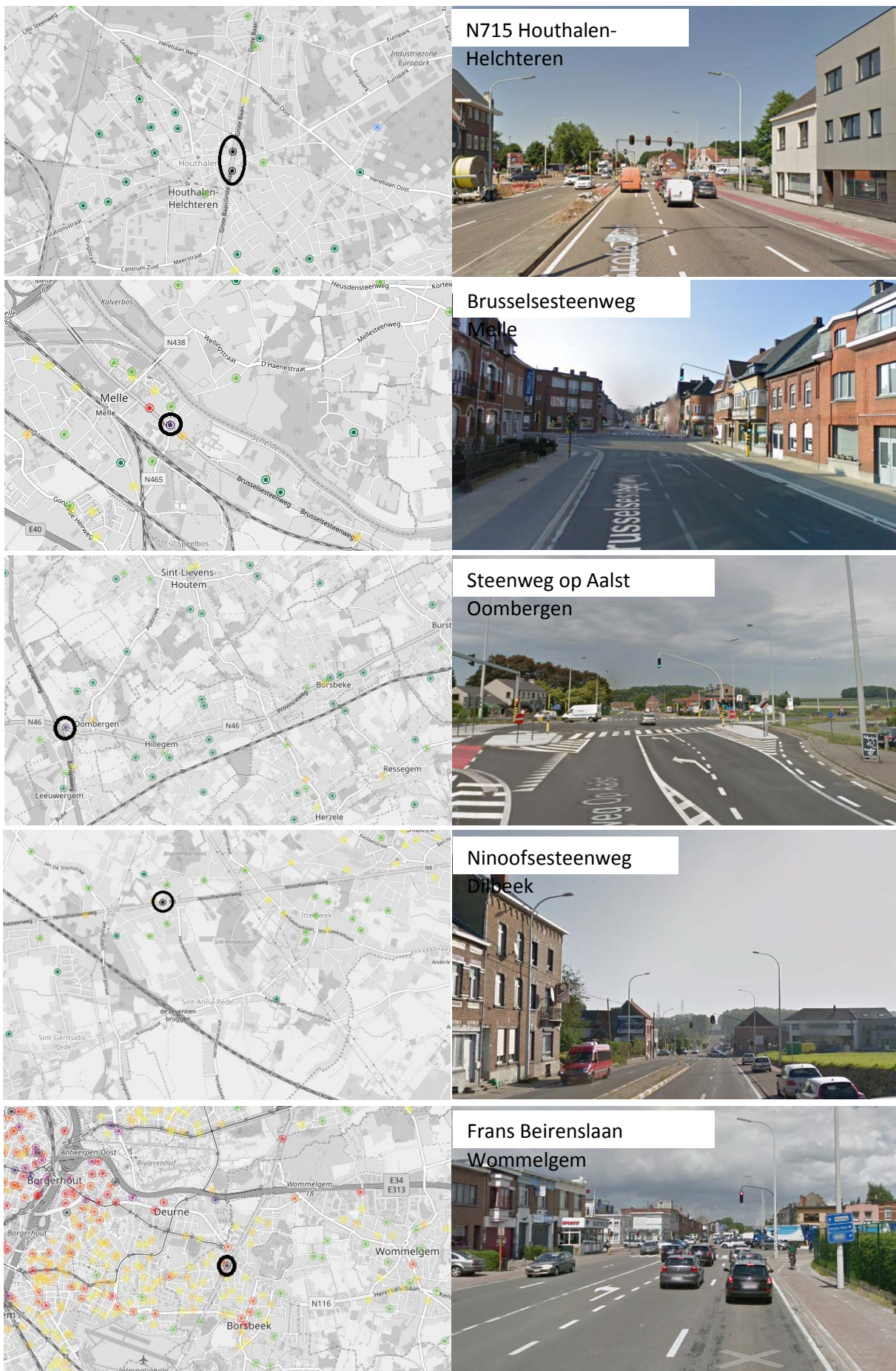
Provincie	Aantal meetpunten >50
West-Vlaanderen	2
Oost-Vlaanderen	14
Vlaams-Brabant	8
Antwerpen	32
Limburg	4
Totaal Vlaanderen	60

Tabel 7: Overzicht van het aantal meetlocaties met indicatieve jaarwaarde NO₂ boven 50 µg m⁻³.

Een belangrijke kanttekening is dat de CurieuzeNeuzen dataset geen volledige lijst oplevert van de zwarte kruispunten in Vlaanderen. Ofschoon er 20.000 meetlocaties waren over Vlaanderen, is er zeker niet op elk potentieel zwart kruispunt gemeten. Het totaal aantal locaties met “zwarte kruispunten” in Vlaanderen is dus zeker hoger, en het verder “identificeren” en “inventariseren” van zwarte kruispunten is dan ook een belangrijke taak.

Beleidsaanbeveling: Wanneer het gaat over extreem hoge concentraties en overschrijdingen, dan wordt tot nu toe haast exclusief de aandacht toegespitst op zogenaamde “stedelijke street canyons”. De “zwarte kruispunten” duiken prominent op in de CurieuzeNeuzen dataset. Ze zijn te vinden op drukke gewestwegen en ringwegen rond steden en vormen een fenomeen dat aparte aandacht verdient. Hun voorkomen lijkt direct gelinkt aan verhoogde emissies door een combinatie van een hoge verkeersintensiteit (tweebaanswegen) met stop-en-go verkeer aan kruispunten en bebouwing (hoewel vaak laag, soms ook geen). Gezien de hoge concentraties zullen deze punten nog lang in de toekomst tot een normoverschrijding leiden. Een (sterke) algemene reductie in verkeersemisies in Vlaanderen zal niet volstaan. De remediëring van “zwarte kruispunten” kan mogelijk door:

- specifieke reductie van de lokale verkeersdruk
- verbetering doorstroming op de kruispunten en dus minder emissies door stop-en-go verkeer (bv. betere afstemming verkeerslichten)
- open maken en betere ventilatie van kruispunten (bv. uitruilbare bouwrechten gebruiken om bewoning rond zwarte kruispunten in het buitengebied aan te pakken)
- alternatieve wegen voor voetgangers en fietsers (die hen omleiden rond het kruispunt)



Figuur 32: Andere voorbeelden van zwarte kruispunten buiten stadsringen.

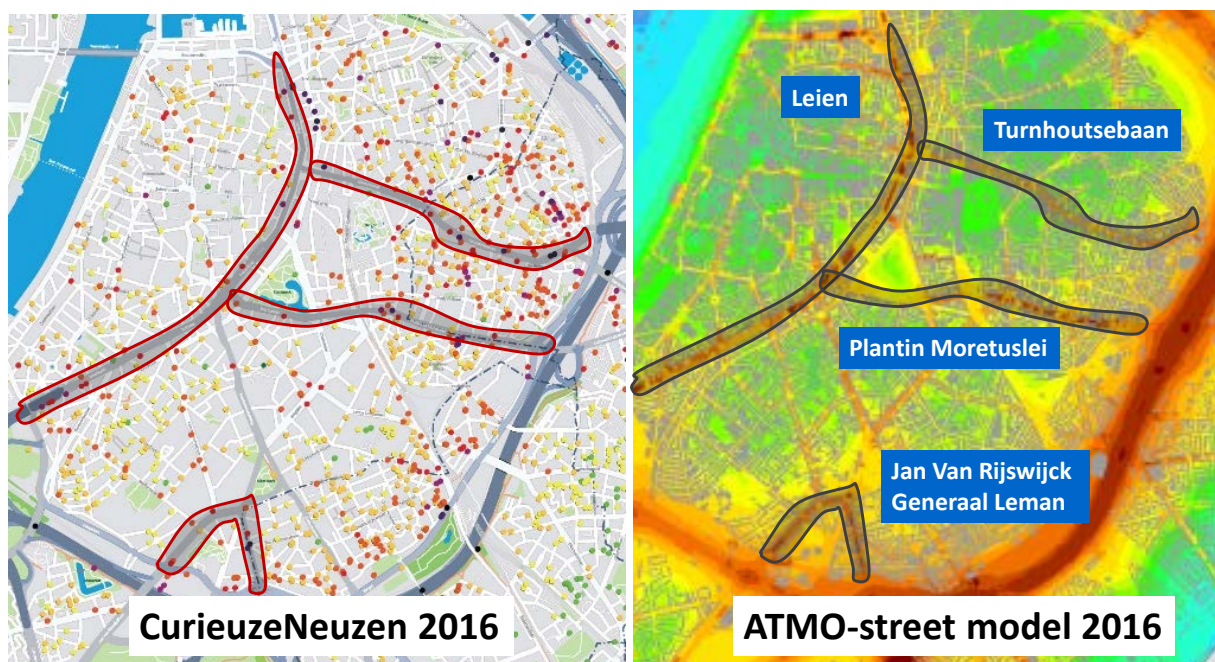
4.4. Paarse stadsaders

“Paarse stadsaders” zijn nauwe, verkeersdrukke straten in binnensteden waar de luchtverontreiniging sterk accumuleert door ingesloten bebouwing. Dit zijn met andere woorden stedelijke street canyons waar veel verkeer door gaat. De CurieuzeNeuzen dataset levert duidelijke inzichten op over het aantal en voorkomen van paarse stadsaders. Deze inzichten zijn reeds besproken in sectie 3.3.3.

Het correct identificeren en inventariseren van de paarse stadsaders uitermate belangrijk voor het luchtkwaliteitsbeleid op stedelijk en Vlaams niveau. Het uitgebreide en fijnmazige karakter van een ruimtelijke samplingscampagne zoals CurieuzeNeuzen helpt daarbij en zorgt voor een schat aan nieuwe informatie. Brede ruimtelijke **campagnes zoals CurieuzeNeuzen zijn dus een cruciale aanvulling voor de klassieke meetstrategie die gebruikt wordt de VMM en andere milieuagentschappen in Europa** (die gebaseerd is op twee pijlers: referentie monitoring stations en via het inzetten van luchtkwaliteitsmodellen die de luchtvervuiling berekenen op basis van o.a. emissies en meteorologische data).

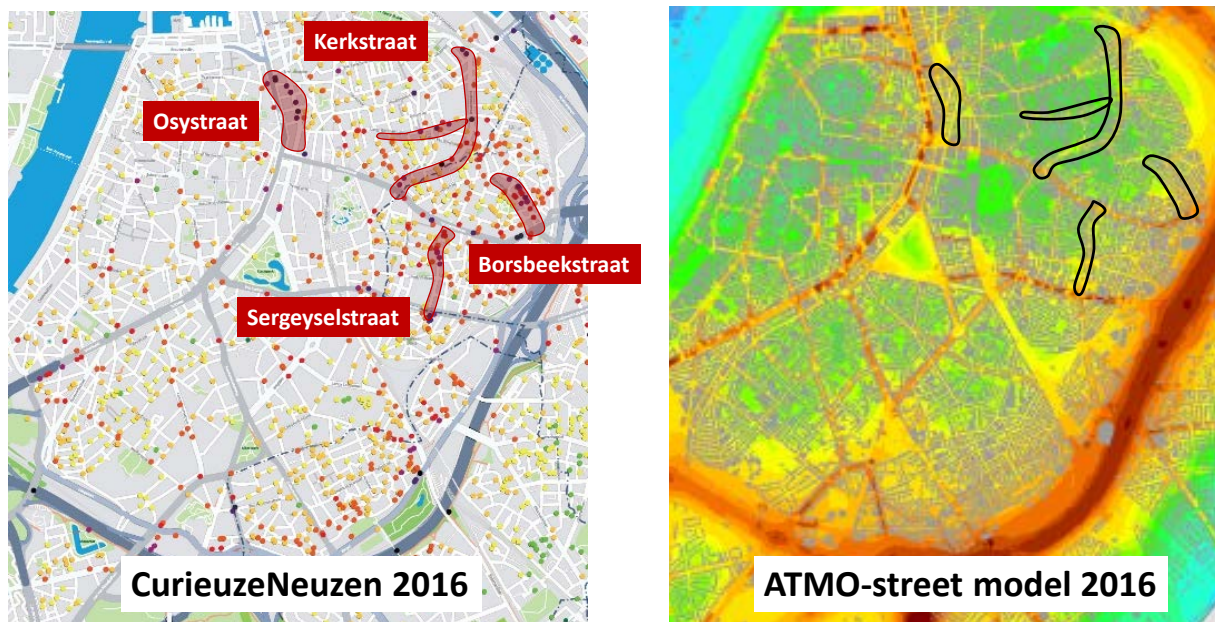
Het inzetten van passieve samplers zorgt voor een accurater inzicht in het voorkomen van paarse stadsaders. Dit kwam reeds sterk naar voren in de CurieuzeNeuzen 2016 campagne in Antwerpen. Op basis van vergelijking tussen de NO₂ data vergaard in CurieuzeNeuzen 2016 en de overeenkomstige NO₂ simulaties door het geavanceerde ATMO-Street computermodel kunnen twee verschillende types van paarse stadsaders of drukke stedelijke street canyons onderscheiden worden:

- “zichtbare” street canyons = straten met hoge concentraties in zowel de data als de modelsimulatie (Figuur 35).
- “onzichtbare” street canyons = straten met hoge concentraties in de data, maar die niet als street canyon herkend worden in de modelsimulatie (Figuur 36).



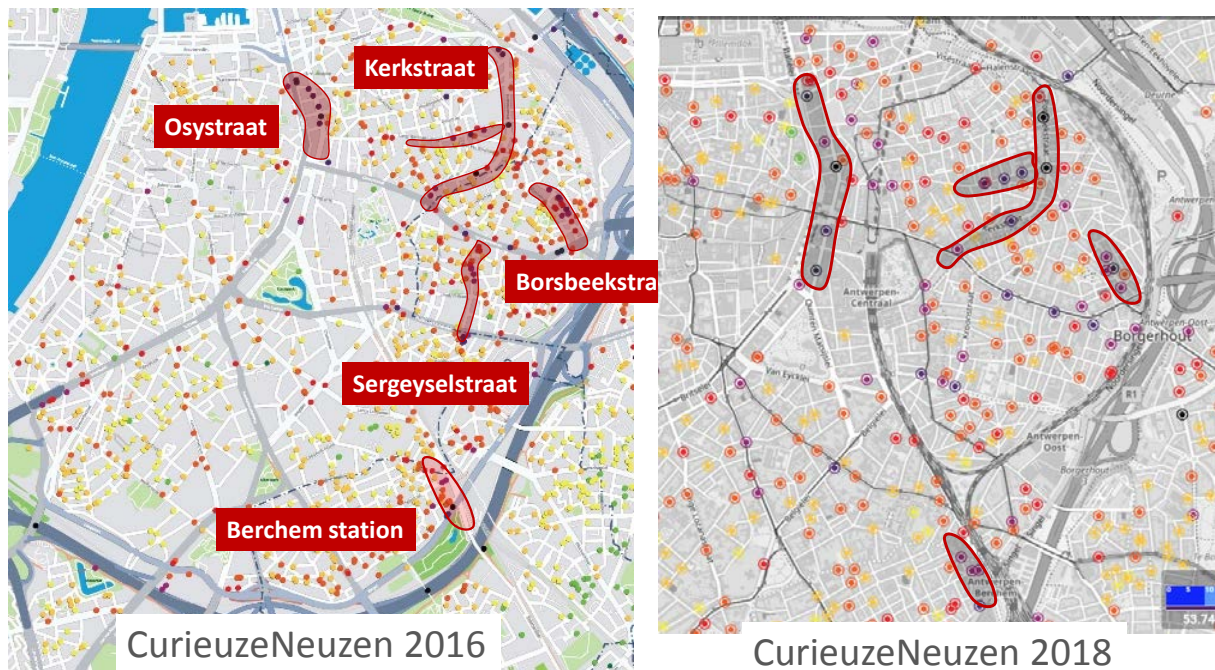
Figuur 33. Overzicht van de belangrijkste “zichtbare” street canyons in Antwerpen 2016. Links de data van de CurieuzeNeuzen 2016 campagne en rechts de simulatie via het ATMO-Street model (voorheen het RIO-IFDM-OSPM model).

Een belangrijk resultaat van CurieuzeNeuzen 2016 was de identificatie van verschillende “onzichtbare” street canyons in Antwerpen (Figuur 36). In een aantal Antwerpse straten (Osysteet, Kerkstraat- Lange Beeldekens, Borsbeekstraat, Sergeyselsstraat) werden zeer hoge NO₂ waarden gemeten, terwijl voor deze straten veel lagere concentraties werden berekend via de computersimulaties. De belangrijkste reden waarom deze street canyons “onzichtbaar” blijven (althans voor het computermodel) is omdat de onderliggende verkeersdata in het computermodel niet correct of achterhaald zijn. Dit is dus niet zozeer een probleem van het computermodel an sich, maar van het gebrek aan betrouwbare verkeersdata op het onderliggende (stedelijke) wegennet in Vlaanderen.



Figuur 34. Overzicht van de belangrijkste “onzichtbare” street canyons, zoals die naar voor kwamen in CurieuzeNeuzen Antwerpen 2016. Links de data van de CurieuzeNeuzen 2016 campagne en rechts de simulatie via het ATMO-Street model (voorheen het RIO-IFDM-OSPM model).

De CurieuzeNeuzen 2018 Vlaanderen bevestigt volledig de resultaten van CurieuzeNeuzen 2016 Antwerpen. De “onbekende” street canyons die hoog scoorden in Antwerpen 2016, vertonen dezelfde hoge NO₂ concentraties in CurieuzeNeuzen 2018 (Figuur 36). De enige uitzondering is de Sergeyselsstraat, die in mei 2018 volledig afgesloten was voor het verkeer door de herinrichting het Moorkensplein. Straten met sterk afwijkende verkeer t.o.v. de normale situatie, werden uitgesloten bij de selectie van de CurieuzeNeuzen 2018 meetpunten (daardoor zijn er geen meetlocaties in de Sergeyselsstraat en kan er geen uitspraak over gebeuren).



Figuur 35. Vergelijking van de “onzichtbare” street canyons in CurieuzeNeuzen 2016 Antwerpen met CurieuzeNeuzen 2018 Vlaanderen. Dezelfde starten vertonen dezelfde hoge NO₂ concentraties, met uitzondering van Sergeyselsstraat, die in mei 2018 volledig afgesloten was voor het verkeer.

Beleidsaanbeveling:

- Simulaties via luchtkwaliteitmodellen zijn een belangrijke hoeksteen van het Vlaamse en stedelijke beleid rond luchtkwaliteit. Het fenomeen van de “onzichtbare” street canyons illustreert dat deze modelsimulaties kritisch afhankelijk zijn van betrouwbare input data over de verkeersintensiteit in alle straten in Vlaanderen. Op dit moment ontbreekt het in Vlaanderen aan systematisch data over verkeersintensiteit in binnenstedelijke straten. Deze data dient up-to-date te zijn (om in te spelen op recente trends en beleidsimpact), systematisch vergaard (dus niet enkel de hoofdwegen en autosnelwegen, maar alle straten) en gediversifieerd (niet alleen gemotoriseerd verkeer, maar ook fietsers en voetgangers).

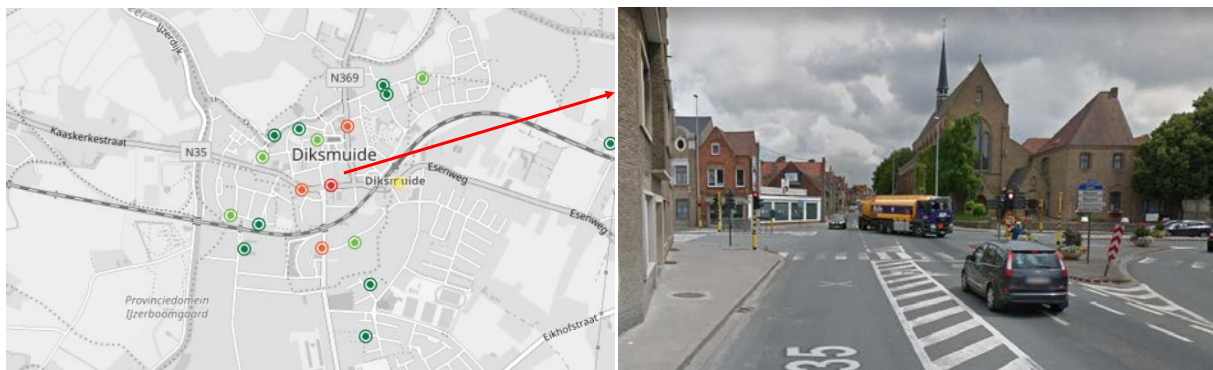
4.5. Rode landelijke hotspots

Opvallend in de CurieuzeNeuzen dataset zijn de meetlocaties in dorpskernen en kleine steden met sterk verhoogde concentraties t.o.v. de omliggende straten. Deze “rode landelijke hotspots” vertonen een NO₂ concentratie in de range 35-45 µg m⁻³ (oranje – rode kleurencodes op de stippenkaart) terwijl de andere straten in het dorp beduidend lagere concentraties hebben 15-25 µg m⁻³ (groene kleurencodes op de stippenkaart).

Indien we de meetlocaties met rode hotspots nader bekijken, dan voldoen ze vaak aan meerdere van onderstaande punten:

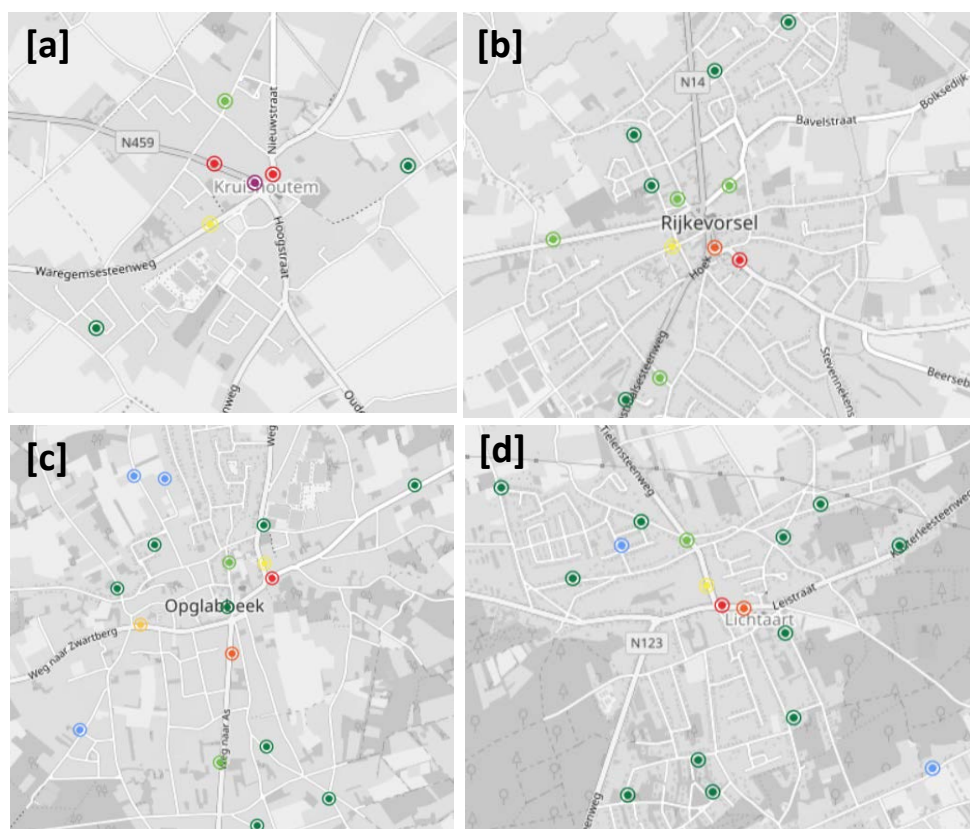
- ze bevinden zich typisch centraal in de gemeente
- ze liggen aan een drukke verkeersweg die door het dorp of de gemeente snijdt
- ze bevinden zich quasi altijd nabij een kruispunt (verhoogde emissies door stop-en-go verkeer nabij verkeerslichten of rotonde)
- ze zijn ingesloten door bebouwing
- ze zijn onderhevig aan filevorming en stop-en-go verkeer

Een typische voorbeeld vinden we in Diksmuide (**Figuur 38**). Deze gemeente telt 4 “rode hotspot” meetlocaties in het centrum van de stad. De meetlocatie met de hoogste NO₂ concentratie ligt nabij het centrale kruispunt in de gemeente, en de andere drie op de invalswegen naar dit kruispunt. Er zijn geen officiële data beschikbaar over verkeersintensiteit en filevorming voor deze locatie. Verkeersintensiteit en filevorming worden in Vlaanderen immers enkel systematisch gemonitord op de hoofdwegen. Navraag leert dat deze locatie inderdaad gekenmerkt wordt door filevorming en stop-en-go verkeer in de ochtend - en avondspits.



Figuur 36. Rode hotspots in het centrum van Diksmuide.

Diksmuide vormt verre van een uitzondering in Vlaanderen. Andere voorbeelden zijn Kruishoutem, Rijkevorsel, Opglabbeek, en Lichtaart (**Figuur 39**), maar nog veel andere gemeenten vertonen ook eenzelfde patroon.



Figuur 37: Vier gemeenten in Vlaanderen met rode hotspots in het centrum. [a] Kruishoutem, [b] Rijkevorsel, [c] Opglabbeek, en [d] Lichtaart.

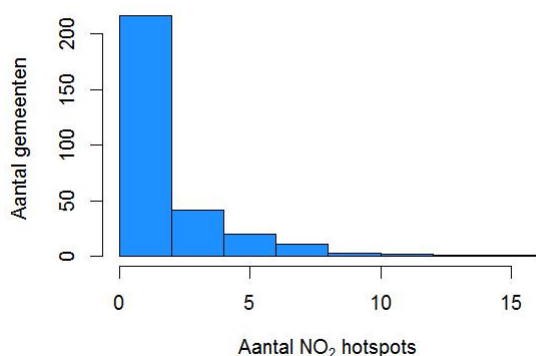
Om een beter zicht te krijgen op het fenomeen, hebben we het aantal hotspots systematisch gekwantificeerd in alle dorpen en kleine steden met een inwonersaantal < 50.000. Daarbij wordt een “hotspot” gedefinieerd als een meetlocatie waar de NO₂ concentratie substantieel hoger ligt dan de gemeentelijke achtergrondconcentratie, die berekend wordt als de gemiddelde NO₂ concentratie van het P10-kwantiel van de NO₂ data voor de gemeente (zelfde berekeningsprocedure van de achtergrondconcentratie als bij de 12 grote steden). Als drempelwaarde van ΔC_L werden zowel 10 $\mu\text{g m}^{-3}$ (zelfde criterium als bij de steden) alsook 15 $\mu\text{g m}^{-3}$ geëvalueerd.

	Hotspot >10	Hotspot >15
Aantal	1471	536
Percentage	10.7%	3.9%

Tabel 8: Aantal meetlocaties dat voldoet aan hotspot criteria gebaseerd op de grootte van de geschatte lokale component.

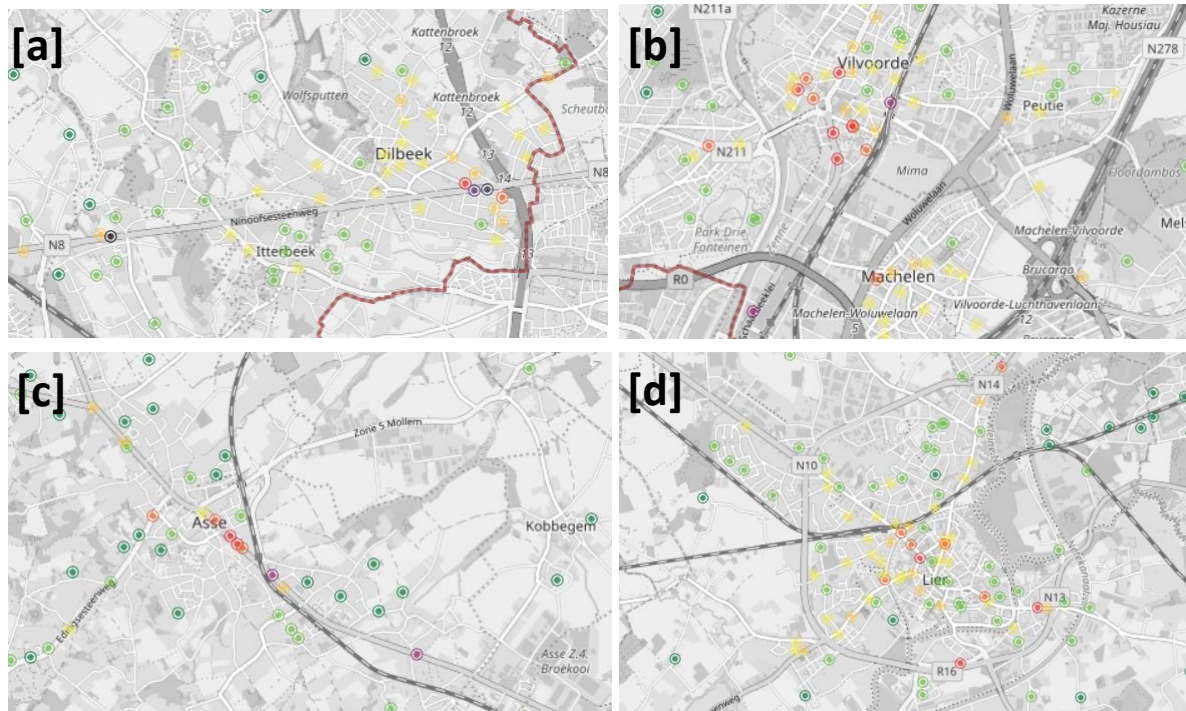
In totaal voldeden 1471 meetlocaties (10.7% van alle meetlocaties) aan het “hotspot” criterium $\Delta C_L > 10 \mu\text{g m}^{-3}$ en 536 meetlocaties aan het strengere “hotspot” criterium $\Delta C_L > 15 \mu\text{g m}^{-3}$ (3.9% van alle meetlocaties). Er dient in acht genomen dat deze “hotspot” punten centraal gelegen zijn in de gemeente, en dus proportioneel belangrijker zijn in termen van blootstelling (er passeren veel voetgangers en fietsers, er liggen soms terrasjes aan het dorpsplein enz.).

Van de 296 gemeentes in Vlaanderen (met inwoners < 50.000) hebben er 174 (ofwel 59%) minstens 1 hotspot locatie die 15 $\mu\text{g m}^{-3}$ hoger ligt dan de gemeentelijke achtergrondconcentratie en 249 (ofwel 84%) minstens 1 hotspot locatie die 10 $\mu\text{g m}^{-3}$ hoger ligt dan de gemeentelijke achtergrondconcentratie. Het is dus een wijdverbreid fenomeen. In sommige hotspots stijgt de NO₂ concentratie zodanig dat ze uitstijgt boven de EU/WGO grenswaarde van 40 $\mu\text{g m}^{-3}$. Van de 296 gemeenten in Vlaanderen zijn er 78 gemeenten (ofwel 26%) die minstens 1 hotspot locatie hebben waar de EU/WGO grenswaarde overschreden wordt. Een belangrijke conclusie is dus dat de overschrijding van de EU/WGO luchtkwaliteitsnormen in Vlaanderen geen exclusief probleem is van de steden. Hierbij benadrukken we nogmaals dat onze dataset geen volledig beeld geeft en het werkelijk aantal gemeenten met overschrijdingen waarschijnlijk hoger zal liggen.



Figuur 38: Histogram van het aantal hotspots per gemeente. De meeste gemeenten hebben 1 of 2 hotspots onder de meetlocaties. Een aantal gemeenten hebben meerdere hotspot locaties.

Een beperkt aantal gemeenten worden gekenmerkt door het veelvuldige voorkomen van hotspot locaties met $\Delta C_L > 15 \mu\text{g m}^{-3}$. Er zijn 4 gemeenten met meer dan 10 dergelijke locaties: Dilbeek (16 locaties), Asse (14), Lier (12) en Vilvoorde (11). Het hoge aantal hotspot locaties in Dilbeek en Asse wordt verklaard doordat er een drukke steenweg langgerekt doorheen het dorp snijdt, waarbij woonfunctie en verkeersfunctie gemengd worden. In Vilvoorde en Lier is het hoge aantal hotspot locaties deels te wijten aan verhoogde concentraties in het centrum van de gemeente (en dus een sterk verschil in concentratie niveaus met de buitenwijken).



Figuur 39: Vier gemeenten in Vlaanderen met een verhoogd aantal hotspots in het centrum. [a] Dilbeek, [b] Asse, [c] Vilvoorde, en [d] Lier.

Een belangrijke kanttekening is dat de CurieuzeNeuzen dataset geen volledige lijst oplevert van hotspot locaties in Vlaanderen. Ondanks de fijnmazige sampling in CurieuzeNeuzen met 20.000 meetlocaties over geheel Vlaanderen, zijn er veel gemeenten waar op potentiële hotspots geen meetlocaties zijn. Het totaal aantal gemeenten met hotspot locaties ligt dus met grote waarschijnlijkheid hoger dan boven berekend. Het verder “identificeren” en “inventariseren” van rode hotspots in dorpskernen is dan ook een belangrijke taak.

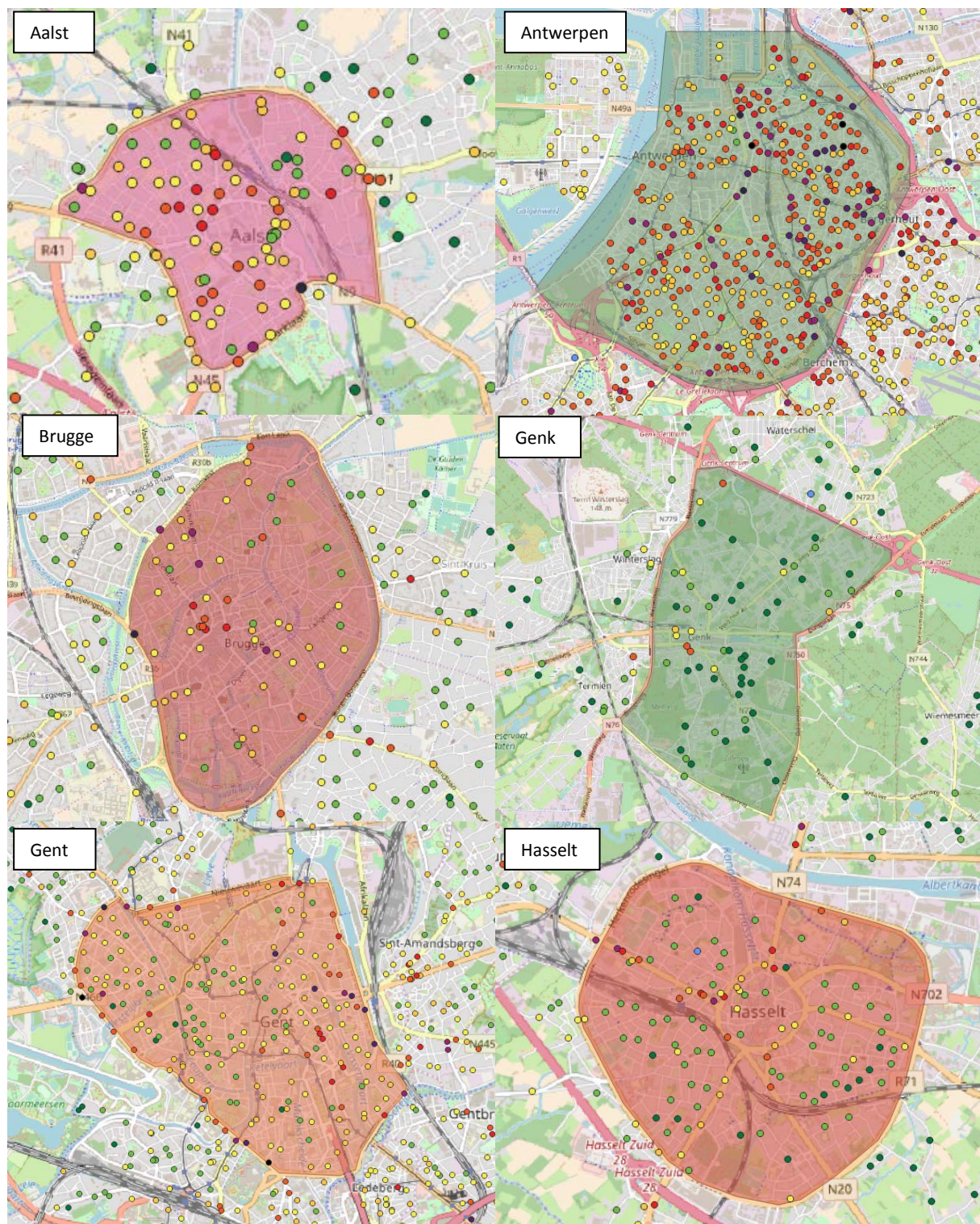
Beleidsaanbevelingen:

- Filevorming wordt tot nu toe enkel systematisch gemonitord op het hoofdwegennet. Echter, in veel dorpskernen in Vlaanderen zijn er ook files, wat zich reflecteert in “landelijke rode hotspots”. Deze files op secundaire wegen en de effecten op luchtkwaliteit worden niet systematisch gemonitord of onderzocht, maar lijken zeer relevant in termen van blootstelling. De rode hotspots zijn gelegen op de meest druk bevolkte punten in het niet-stedelijke gebied.
- Stop-en-go verkeer lijkt essentieel in de rode hotspots die opduiken op de stippenkaart. Een kwantitatieve studie van het belang van stop-en-go verkeer in de lokale luchtkwaliteit is een aandachtspunt.

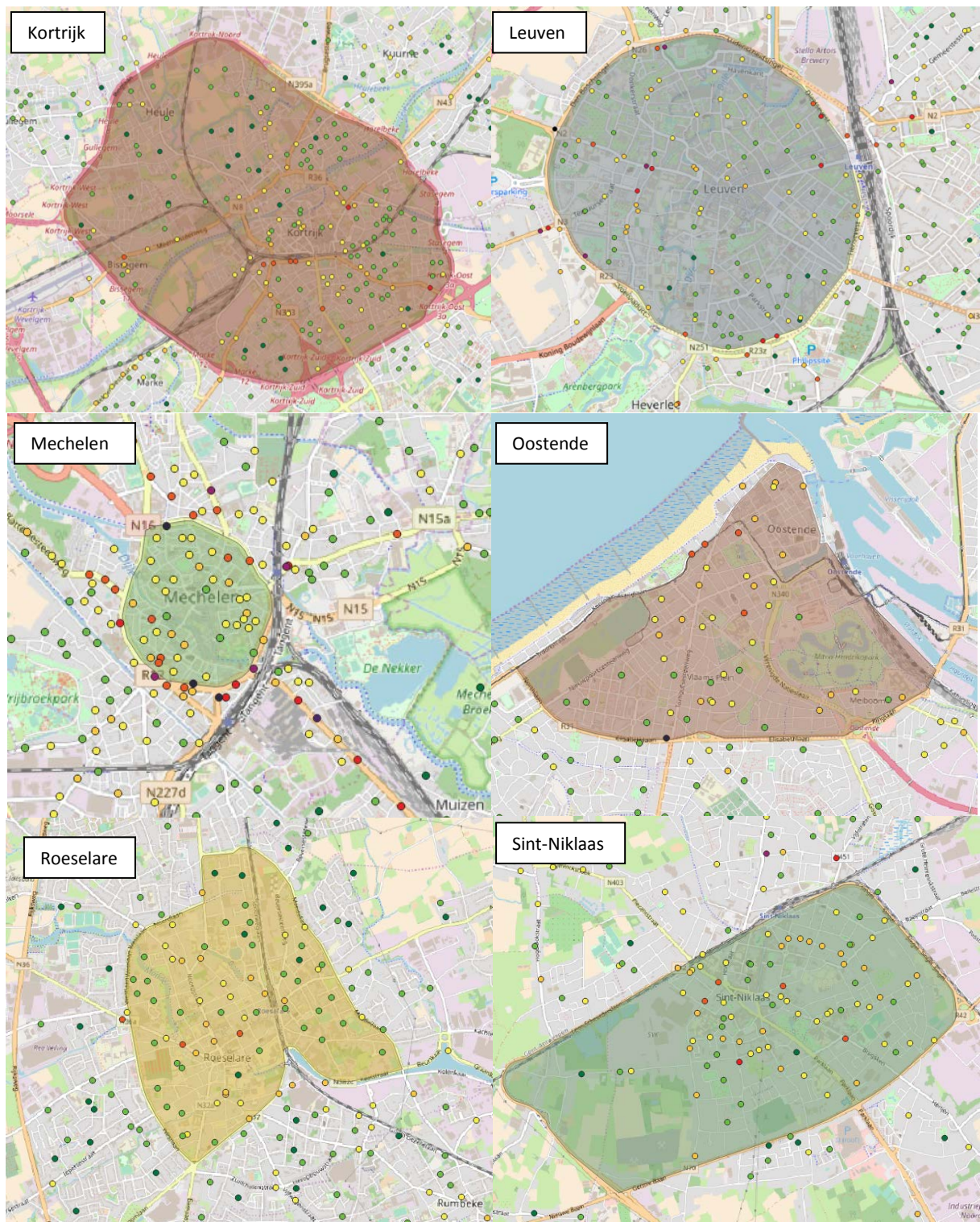
Appendix

A.1 Afbakening stadscentra

De stadscentra van de 12 Vlaamse steden met meer dan 50.000 inwoners - zijnde Aalst, Antwerpen, Brugge, Genk, Gent, Hasselt, Kortrijk, Leuven, Mechelen, Oostende, Roeselare, en Sint-Niklaas - zijn afgebakend op basis van de grote verkeersaders die deze centra omsluiten, of hun “ringen”. De grens werd getrokken op de rijbaan van deze ringen, zodat enkel meetpunten aan gevels die binnen de ring liggen tot het stadscentrum werden gerekend. Figuren A.1 en A.2 tonen de zo bekomen stadcentra.



Figuur A.1: Afgebakende centra van Aalst, Antwerpen, Brugge, Genk, Gent, en Hasselt



Figuur A.2: Afgebakende centra van Kortrijk, Leuven, Mechelen, Oostende, Roeselare en Sint-Niklaas

A.2 Additionele informatie steden

	Stad	Inwoners	Opper- vlakte (km ²)	Bevolkings- dichtheid (inwoners km ⁻²)
1	ANTWERPEN	520504	204.51	2545
2	GENT	259083	156.18	1659
3	BRUGGE	118187	138.40	854
4	LEUVEN	100291	56.63	1771
5	MECHELEN	85665	65.19	1314
6	AALST	84329	78.12	1086
7	HASSELT	77124	102.24	754
8	SINT-NIKLAAS	76028	83.80	907
9	KORTRIJK	75736	80.02	946
10	OOSTENDE	70994	37.72	1882
11	GENK	65986	87.85	751
12	ROESELARE	61657	59.79	1031

Tabel A.1. Basisinformatie over de 12 steden met een inwonersaantal groter dan 50.000.

Stad (geheel)	n	NO ₂	Min	Max	BG	n>20	p>20	n>40	p>40	n>50	p>50
ANTWERPEN	1009	33.8	17.0	63.7	23.5	1003	99.4	172	17.0%	26	2.6%
GENT	809	27.7	14.9	72.5	19.8	767	94.8	43	5.3%	9	1.1%
BRUGGE	335	25.9	15.9	58.8	19.0	299	89.3	12	3.6%	1	0.3%
LEUVEN	413	24.1	13.9	66.4	16.7	305	73.8	14	3.4%	1	0.2%
MECHELEN	234	27.6	15.7	58.8	19.4	220	94.0	15	6.4%	3	1.3%
AALST	252	25.3	13.4	57.3	16.6	184	73.0	10	4.0%	1	0.4%
HASSELT	286	23.0	13.9	49.9	15.9	180	62.9	11	3.8%	0	0%
SINT-NIKLAAS	210	25.3	14.8	49.1	18.0	178	84.8	4	1.9%	0	0%
KORTRIJK	269	24.2	16.5	45.0	18.8	235	87.4	2	0.7%	0	0%
OOSTENDE	100	26.4	17.1	58.1	19.8	96	96.0	1	1.0%	1	1.0%
GENK	128	20.8	14.7	40.2	15.7	58	45.3	1	0.8%	0	0%
ROESELARE	202	23.5	15.2	38.2	17.7	154	76.2	0	0%	0	0%

Stad (centrum)	n	NO ₂	Min	Max	BG	n>20	p>20	n>40	p>40	n>50	p>50
ANTWERPEN	356	38.4	22.4	63.7	29.9	356	100	112	31.5	18	5.1
GENT	174	30.2	19.8	53.7	22.3	173	99.4	19	10.9	6	3.4
BRUGGE	52	31.7	22.5	58.8	23.3	52	100	8	15.4	1	1.9
LEUVEN	99	28.4	19.0	49.2	20.5	97	98	10	10.1	0	0
MECHELEN	36	30.4	24.1	58.8	24.9	36	100	2	5.6	1	2.8
AALST	70	31.2	19.9	49.8	22.6	69	98.6	8	11.4	0	0
HASSELT	100	26.3	17.2	47.4	19.4	95	95	6	6.0	0	0
SINT-NIKLAAS	74	28.8	19.5	41	21.6	72	97.3	2	2.7	0	0
KORTRIJK	163	25.1	18.1	45	19.7	153	93.9	2	1.2	0	0
OOSTENDE	39	29.4	21.2	58.1	22.9	39	100	1	2.6	1	2.6
GENK	54	21.6	16.1	40.2	16.8	25	46.3	1	1.9	0	0
ROESELARE	58	25.6	19.5	38.2	19.9	54	93.1	0	0	0	0

Tabel A.3. Basis statistische parameters voor de 12 steden in Vlaanderen met een inwonersaantal groter dan 50.000. De dataset behelst de **meetlocaties in het centrum van de stad**, afbakening zie sectie A.1. Symbolen n : aantal CurieuzeNeuzen meetlocaties. NO₂ = gemiddelde NO₂ concentratie (µg m⁻³); Min = minimale NO₂ concentratie (µg m⁻³); Max = maximale NO₂ concentratie (µg m⁻³); BG = achtergrond NO₂ concentratie (µg m⁻³). n>XX = aantal meetlocaties met een NO₂ concentratie groter dan de drempelwaarde XX; p>XX = percentage van de meetlocaties met een NO₂ concentratie groter dan de drempelwaarde XX. Alle NO₂ concentraties zijn indicatieve jaarwaarden.

Stad (buiten)	n	NO ₂	Min	Max	BG	n>20	p>20	n>40	p>40	n>50	p>50
ANTWERPEN	653	31.3	17.0	59.7	22.5	647	99.1	60	9.2	8	1.2
GENT	635	27.0	14.9	72.5	19.5	594	93.5	24	3.8	3	0.5
BRUGGE	283	24.8	15.9	46.0	18.9	247	87.3	4	1.4	0	0
LEUVEN	314	22.7	13.9	66.4	16.4	208	66.2	4	1.3	1	0.3
MECHELEN	198	27.1	15.7	58.3	19.2	184	92.9	13	6.6	2	1.0
AALST	182	22.9	13.4	57.3	16.2	115	63.2	2	1.1	1	0.5
HASSELT	186	21.3	13.9	49.9	15.5	85	45.7	5	2.7	0	0
SINT-NIKLAAS	136	23.4	14.8	49.1	17.4	106	77.9	2	1.5	0	0
KORTRIJK	106	22.9	16.5	34.1	18.2	82	77.4	0	0	0	0
OOSTENDE	61	24.6	17.1	37.1	19.2	57	93.4	0	0	0	0
GENK	74	20.2	14.7	36.0	15.4	33	44.6	0	0	0	0
ROESELARE	144	22.6	15.2	37.5	17.4	100	69.4	0	0	0	0

Tabel A.4. Basis statistische parameters voor de 12 steden in Vlaanderen met een inwonersaantal groter dan 50.000. De dataset behelst de **meetlocaties buiten het centrum van de stad**, afbakening zie sectie A.1. Symbolen n : aantal CurieuzeNeuzen meetlocaties. NO₂ = gemiddelde NO₂ concentratie (µg m⁻³); Min = minimale NO₂ concentratie (µg m⁻³); Max = maximale NO₂ concentratie (µg m⁻³); BG = achtergrond NO₂ concentratie (µg m⁻³). n>XX = aantal meetlocaties met een NO₂ concentratie groter dan de drempelwaarde XX; p>XX = percentage van de meetlocaties met een NO₂ concentratie groter dan de drempelwaarde XX. Alle NO₂ concentraties zijn indicatieve jaarwaarden.

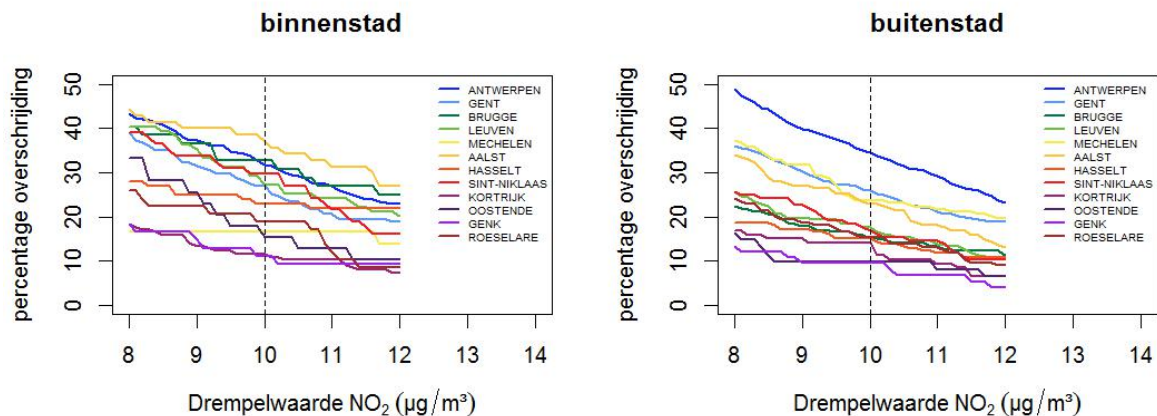
	Binnenstad			Buitenstad		
Stad	n	n.HV	p.HV (%)	n	n.HV	p.HV (%)
AALST	70	26	37.1	182	42	23.1
ANTWERPEN	356	113	31.7	653	225	34.5
BRUGGE	52	17	32.7	283	43	15.2
GENK	54	6	11.1	74	7	9.5
GENT	174	47	27.0	635	165	26.0
HASSELT	100	23	23.0	186	28	15.1
KORTRIJK	163	19	11.7	106	15	14.2
LEUVEN	99	27	27.3	314	56	17.8
MECHELEN	36	6	16.7	198	47	23.7
OOSTENDE	39	6	15.4	61	6	9.8
ROESELARE	58	11	19.0	144	22	15.3
SINT-NIKLAAS	74	22	29.7	136	23	16.9

Tabel A.5. Hoge Verkeersimpact (HV) voor de 12 steden in Vlaanderen met een inwonersaantal groter dan 50.000. n : aantal CurieuzeNeuzen meetlocaties. n.HV = aantal meetlocaties die voldoen aan Hoge Verkeersimpact criterium. p.HV = procentueel aantal meetlocaties die voldoen aan Hoge Verkeersimpact criterium. Alle NO₂ concentraties zijn indicatieve jaarwaarden.

Stad	ΔC_{BG}	ΔC_R	ΔC_C	ΔC_L
ANTWERPEN	10.9	11.6	7.4	8.5
BRUGGE	10.9	8	4.4	8.4
AALST	10.9	5.3	6.4	8.6
MECHELEN	10.9	8.3	5.7	5.5
GENT	10.9	8.6	2.8	7.9
OOSTENDE	10.9	8.3	3.7	6.5
SINT-NIKLAAS	10.9	6.5	4.2	7.2
LEUVEN	10.9	5.5	4.1	7.9
HASSELT	10.9	4.6	3.9	6.9
ROESELARE	10.9	6.5	2.5	5.7
KORTRIJK	10.9	7.3	1.5	5.4
GENK	10.9	4.5	1.4	4.8

Tabel A.6. Decompositie van de gemiddelde concentratie voor de 12 steden in Vlaanderen met een inwonersaantal groter dan 50.000. De gemiddelde NO₂ concentratie wordt opgesplitst in een landelijke achtergrond ΔC_{BG} , een regionale component ΔC_R , een stedelijke component ΔC_C en een lokale component ΔC_L .

A.3 Sensitiviteitsanalyse HVI index



Figuur A.3. Sensitiviteitsanalyse van de HVI index berekening. Links: binnenstad. Rechts: buitenstad.

Het percentage aan meetpunten dat voldoet aan criterium $\Delta C_L > 10 \mu\text{g m}^{-3}$ vormt dan de HVI (Hoge Verkeersimpact Index). Dit zijn dus locaties de totale concentratie meer dan $10 \mu\text{g m}^{-3}$ hoger is dan de stedelijke achtergrond.

De vraag is hoe sensitief de berekening van de HVI is aan de specifieke keuze van de drempelwaarde $\Delta C_L > 10 \mu\text{g m}^{-3}$. Daartoe varieerden we deze drempelwaarde over -20% ($8 \mu\text{g m}^{-3}$) tot +20% ($12 \mu\text{g m}^{-3}$) van de waarde. De ranking van de steden is weinig sensitief t.o.v. de drempelwaarde (Figuur A.3)

De relatieve positie van de steden wordt in de meeste gevallen behouden, wat suggereert dat de ranking robuust is.

De HVI index in de binnenstad van Mechelen en Hasselt vertoont evenwel een vlakker verloop dan de andere steden. In Hasselt is dit omdat de verdeling sterk bimodaal is. De meeste meetlocaties in de stad hebben beperkte ophoging boven de achtergrond, maar een beperkte aantal meetlocaties (langs de invalswegen naar de kleine ring) toont een hoge ophoging. In Mechelen speelt een gelijkaardig fenomeen. De meeste meetlocaties hebben een beperkte ophoging boven de achtergrond, terwijl een beperkte aantal een hoge ophoging toont.

Opmerking: De ranking van Mechelen heeft een grotere onzekerheid, omdat Mechelen een kleine binnenstad heeft en dus relatief weinig meetlocaties t.o.v. de andere steden. De onzekerheid is echter niet van die mate dat Mechelen ineens zou gaan schuiven in de ranking indien er meer meetlocaties beschikbaar zouden zijn. Binnen Curieuzeneuzen werd een grote fractie van de straten in de binnenstad gesampled - Mechelen heeft eenvoudigweg een kleine binnenstad.