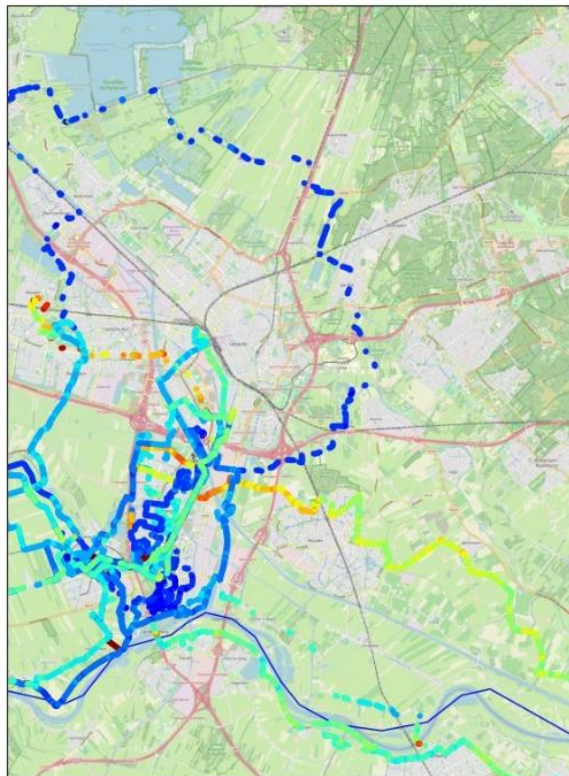


Integratie van snuffelfietsdata in luchtkwaliteitsmodellering voor de Provincie Utrecht



TNO 2024 R11939 – 23 oktober 2024

Integratie van snuffelfietsdata in luchtkwaliteitsmodellering voor de Provincie Utrecht

Author(s)	Ioanna Skoulidou, Ruben Goudriaan
Classification report	TNO Publiek
Title	TNO Publiek
Report text	TNO Publiek
Number of pages	30
Number of appendices	1
Project number	060.54552

Alle rechten voorbehouden

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

© 2024 TNO

Samenvatting

In de Provincie Utrecht hebben meer dan 600 burgers en scholieren op snuffelfietsen fijnstof concentratie data (specifiek PM_{2.5}) verzameld. De Provincie Utrecht heeft TNO gevraagd om de mogelijkheden voor een monitoringsysteem dat mobiele metingen vanuit snuffelfietsen combineert met luchtkwaliteitsmodellering te onderzoeken. De verzamelde mobiele meetdata wordt in dit project gebruikt om het luchtkwaliteitsmodel LOTOS-EUROS te kalibreren via een data assimilatie techniek (Skoulidou et al., 2024). Door zorgvuldig modelberekeningen en metingen te vergelijken wordt een schatting gemaakt van de actuele PM_{2.5} concentraties en de emissies. Dit onderzoek is vanwege de beschikbare meetgegevens uitgevoerd voor de periode maart t/m juni 2022.

De conclusies van dit werk suggereren dat:

1. De achtergrond- en lokale PM_{2.5}-concentraties van LOTOS-EUROS worden verbeterd wanneer rekening wordt gehouden met de meetgegevens van referentiestations en Snuffelfietsdata. Daarbij nemen de gemodelleerde concentraties over het algemeen toe. De modellering met Snuffelfietsdata voorspelt daarbij een grotere lokale bijdrage aan de totale PM_{2.5} concentratie ten opzichte van de regionale achtergrond. Lokale bijdragen worden na de assimilatie geschat op 17-28% van de totale gemodelleerde concentratie PM_{2.5}, waar voor introductie van de Snuffelfietsdata dit op 10-15% werd ingeschat.
2. Deze verhoogde lokale bijdrage is zichtbaar over de hele gemodelleerde regio. Rondom centrum Utrecht is deze verhoging in lokale PM_{2.5} bijdrage het hoogst, tot ongeveer 100% verschil met de initiële modelresultaten. Daarnaast speelt de tijd van het jaar een rol, waarbij met name in juni deze aangepaste lokale concentraties vanwege de Snuffelfietsdata een groot verschil maken. Voor de verwerking van Snuffelfietsdata worden de lokale bijdragen geschat op ongeveer 20% van de totale PM_{2.5} concentratie, na verwerking ligt dit percentage rond de 40% voor de verschillende deelgebieden.
3. Hoewel lastig te valideren, geeft dit hernieuwd inzicht in de ruimtelijke verspreiding van PM_{2.5} en de mogelijke specifieke blootstelling van mensen aan PM_{2.5}. Daarnaast kan het ook meer zeggen over het type bronnen dat bijdraagt. Waar de modelresultaten in combinatie met de snuffelfietsdata een scherpe verhoging in de lokale bijdrage PM_{2.5} voorspellen voor de gemodelleerde periode, is het de vraag of verkeer hier de dominante bron van is. De binnenstad zelf is relatief rustig qua verkeersbewegingen en het verkeer over het algemeen relatief schoon. Mogelijk dat andere bronnen zoals huishoudens en horeca hier een grotere rol spelen. Deze inzichten kunnen bijdragen in het aanscherpen van mogelijke nieuwe onderzoeksvragen, danwel het informeren van meer gerichte maatregelen om de luchtkwaliteit te verbeteren. Ook kan het mogelijke aandachtspunten voor verbetering van ruimtelijke verdeling van emissies aan het licht brengen.

De aanwezige sensorfouten en een gebrek aan beschikbare snuffelfietsmetingen in tijd en ruimte zijn aandachtspunten voor de ontwikkelde methodiek. Meer beschikbare metingen zullen leiden tot een nauwkeuriger weergave van de PM_{2.5}-concentraties. De resolutie van LOTOS-EUROS (~1x1km) kan daarbij zeer lokale variaties niet in beeld brengen. Ook zijn de mogelijkheden tot validatie beperkt doordat er weinig plekken zijn om de modelresultaten te vergelijken met referentie meetgegevens.

Inhoudsopgave

Samenvatting	4
1 Introductie	6
2 Data en methodiek	7
2.1 Vorbewerking Snuffelfietsdata	7
2.2 LOTOS-EUROS model configuratie	8
3 Modelleren met referentiestations	12
3.1 Nationale achtergrond	12
3.2 Provinciale achtergrond en lokale bijdrages (voor gebruik Snuffelfietsdata)	14
4 Modelleren met snuffelfietsdata	17
4.1 Vergelijking modelresultaten en metingen	17
4.2 PM2.5 concentraties op lokaal niveau	19
4.3 PM2.5 emissies op lokaal niveau	22
5 Conclusies en aanbevelingen	24
6 Referenties	26
Handtekening	28
Appendix	
Appendix A: Vorbewerking Snuffelfietsdata	28

1 Introductie

96% van de stedelijke bevolking van de EU wordt blootgesteld aan onveilige concentraties fijnstof (EEA, 2024). Bronnen van fijnstof zijn voornamelijk de verbranding van vaste brandstoffen, huishoudelijke verwarming, industrie en wegverkeer. In 2020 was het energieverbruik van woningen, bedrijven en instellingen de belangrijkste bron van fijnstof in Europa (EEA, 2022). Blootstelling aan fijnstof wordt in verband gebracht met onder meer cardiovasculaire problemen, cerebrovasculaire ziekten en kanker (Hamanaka en Mutlu, 2018). Kleinere deeltjes (met een diameter van 2.5 μm en minder) dragen een extra risico omdat ze dieper in de longen doordringen en het bloed kunnen bereiken (Parrado et al. 2019). Het monitoren van de fijnstofconcentraties is dan ook essentieel om effectieve maatregelen te kunnen nemen om blootstelling aan fijnstof te beperken.

In het kader van het Snuffelfiets-project zijn in de Provincie Utrecht sensoren op fietsen gemonteerd die fijnstof, in de vorm van PM_{2.5}, meten. De metingen zijn geschikt om de luchtkwaliteit in hoge resolutie in kaart te brengen en kunnen inzicht geven in de lokale ruimtelijke variatie, wat met vaste meetlocaties niet mogelijk is. Bovendien bestrijken de fietsen gebieden die niet toegankelijk zijn voor auto's (zoals parken en gebieden die alleen voor voetgangers zijn), evenals fietspaden die langs drukke verkeerswegen liggen. Deze mobiele manier van meten zorgt ervoor dat burgers deel kunnen nemen aan het monitoren van de luchtkwaliteit. Dit kan het bewustzijn van het publiek over klimaatverandering en luchtkwaliteit en de impact van luchtverontreiniging op de gezondheid vergroten. Bovendien kunnen mobiele metingen helpen lokale hotspots te detecteren en de blootstelling van burgers aan luchtvervuiling in de stad te onderzoeken. Burgerwetenschappelijke metingen brengen wel een aantal onzekerheden en beperkingen met zich mee: de onzekerheden van de sensormetingen zijn over het algemeen aanzienlijk en bovendien kan onjuist gebruik van de sensoren door burgers niet altijd worden opgespoord en uitgefilterd uit de uiteindelijke meetdataset. Bovendien is de ruimtelijke en temporele resolutie van mobiele metingen niet gelijkmatig verdeeld over de ruimte: op sommige plekken wordt meer gefietst dan op andere locaties.

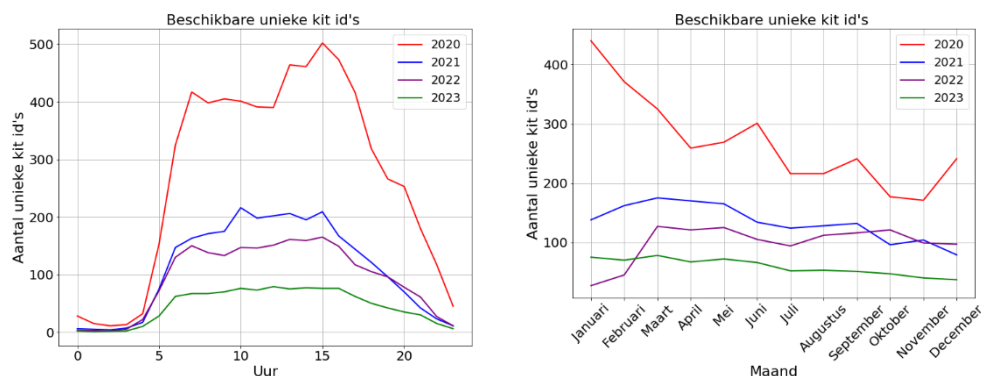
Om de bruikbaarheid van de Snuffelfietsdata te toetsen en de betrokkenheid van burgers bij het monitoren van de luchtkwaliteit te stimuleren, heeft de Provincie Utrecht TNO gevraagd de mogelijkheden voor een monitoringsysteem dat mobiele metingen vanuit snuffelfietsen combineert met luchtkwaliteitsmodellering te onderzoeken. Door middel van data-assimilatiemethoden kunnen we verschillende soorten metingen integreren binnen het LOTOS-EUROS model (Skoulidou et al., 2024). LOTOS-EUROS berekent de luchtkwaliteit op basis van fysische en chemische processen. Daarbij zijn verschillende soorten invoer van belang, zoals emissie-inventarisaties, meteorologie en landgebruik. De verzamelde Snuffelfietsdata wordt in dit project gebruikt om het luchtkwaliteitsmodel LOTOS-EUROS te kalibreren. Hierbij wordt gekeken of Snuffelfietsdata in combinatie met modellering aanvullende inzichten kunnen geven over (lokale) PM_{2.5} concentraties en de bronnen (emissies) die daaraan bijdragen. Daarnaast wordt bekeken of Snuffelfietsdata mogelijk het mobiliteitsbeleid van de Provincie kan ondersteunen. Omdat fietspaden voornamelijk langs wegen liggen, kan worden onderzocht of er een directe relatie kan worden gevonden tussen de Snuffelfietsdata en verkeersgerelateerde emissies.

2 Data en methodiek

2.1 Voorbewerking Snuffelfietsdata

Binnen het Snuffelfiets-project zijn in de Provincie Utrecht fijnstofsensoren van het type Sensirion SPS30 gemonteerd op fietsen (<https://snuffelfiets.nl/>). Al fietsend worden zo de fijnstofconcentraties in de regio in beeld gebracht. Het bedrijf SODAQ verzorgt de levering en het onderhoud van de fietssensoren, het bedrijf Civity is verantwoordelijk voor het databasebeheer en het RIVM ondersteunt de validatie van de data. Daarnaast zijn drie vaste sensoren geïnstalleerd in de buurt van officiële stations van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit (LML). Meer informatie is te vinden in Wesseling, J et al. (2021).

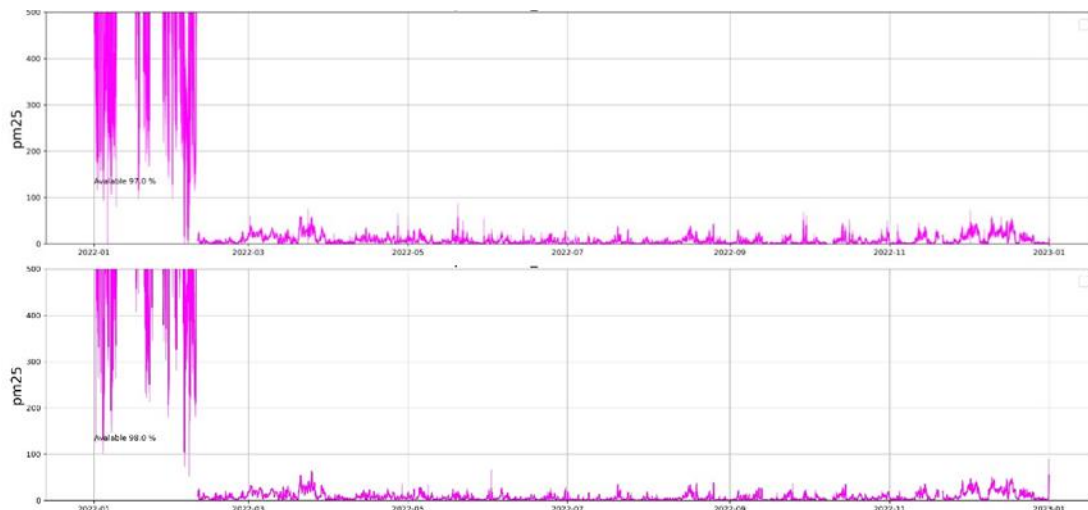
In dit project is de ruwe Snuffelfietsdata voor de jaren 2020, 2021, 2022 en 2023 verkregen van RIVM. Voor dit project zijn alleen metingen van PM_{2.5} gebruikt, omdat de Sensirion SPS30 moeite heeft met het meten van de grove fractie van PM (Hassani, A et al. 2023). De verkregen data zijn opgesplitst tussen de data van de vaste sensoren en de datasets met mobiele sensoren van de snuffelfietsen zelf. De vaste sensoren, geïnstalleerd dichtbij LML-stations, worden gebruikt om de onzekerheden van de sensoren te bestuderen en om de kalibratie van de sensormetingen uit te voeren. De beschikbaarheid van de metingen verschilt tussen de verschillende jaren, seizoenen en uren van de dag. De beschikbare unieke mobiele kit-ID's in 2020, 2021, 2022 en 2023 en de gemiddelde dagelijkse inzet daarvan worden weergegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1: Links: Gemiddeld dagelijks gebruik van unieke ID's in de jaren 2020 (rode lijn), 2021 (blauwe lijn), 2022 (paarse lijn) en 2023 (groene lijn). Rechts: Unieke ID's in gebruik per maand in de jaren 2020 (rode lijn), 2021 (blauwe lijn), 2022 (paarse lijn) en 2023 (groene lijn).

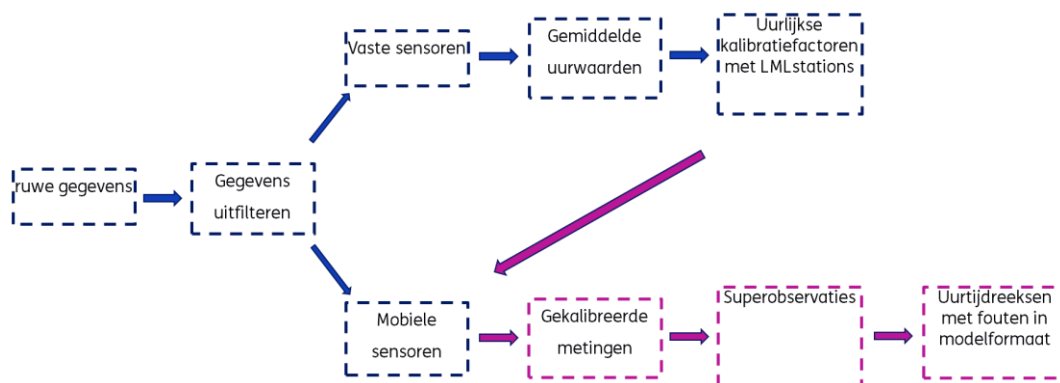
De grafieken laten zien dat de meeste fietsen actief zijn tussen 06.00 en 20.00 uur. Het aantal unieke ID's neemt door de jaren heen af. Over het geheel genomen laat 2023 het laagste gebruik zien, terwijl in 2022 en 2021 een vergelijkbaar aantal gebruikte fiets-ID's actief is. Aangezien het doel van het project is om recente informatie te analyseren, maar tegelijkertijd over voldoende metingen te beschikken, is ervoor gekozen om ons te concentreren op 2022. Daarin bleek dat in de maanden januari en februari 2022 de vaste sensoren onrealistische hoge waarden ($>500 \mu\text{g}/\text{m}^3$) geven waardoor ze onbruikbaar zijn (zichtbaar in Figuur 2.2). In wintermaanden wordt daarbij zichtbaar minder gefietst, als

gevolg daarvan worden deze maanden buiten beschouwing gelaten. Uiteindelijk is besloten dat de periode waar dit project zich op richt maar tot en met juni 2022 betreft.



Figuur 2.2: PM2.5 per uur van vaste sensoren vlakbij de officiële stations Kardinaal de Jongweg (boven) en Cabauw-Wielsekade (onder). Te zien is dat de eerste twee maanden van 2022 foutieve waarden tonen.

Om de sensordata vervolgens optimaal te kunnen combineren met het LOTOS-EUROS model is voorbewerking, filtering en kalibratie nodig. De verschillende stappen staan getoond in het schema in Figuur 2.3. Deze stappen worden uitgebreider toegelicht in Appendix A.



Figuur 2.3: De stapsgewijze voorbewerking van de snuffelfietsdata voor integratie in LOTOS-EUROS.

2.2 LOTOS-EUROS model configuratie

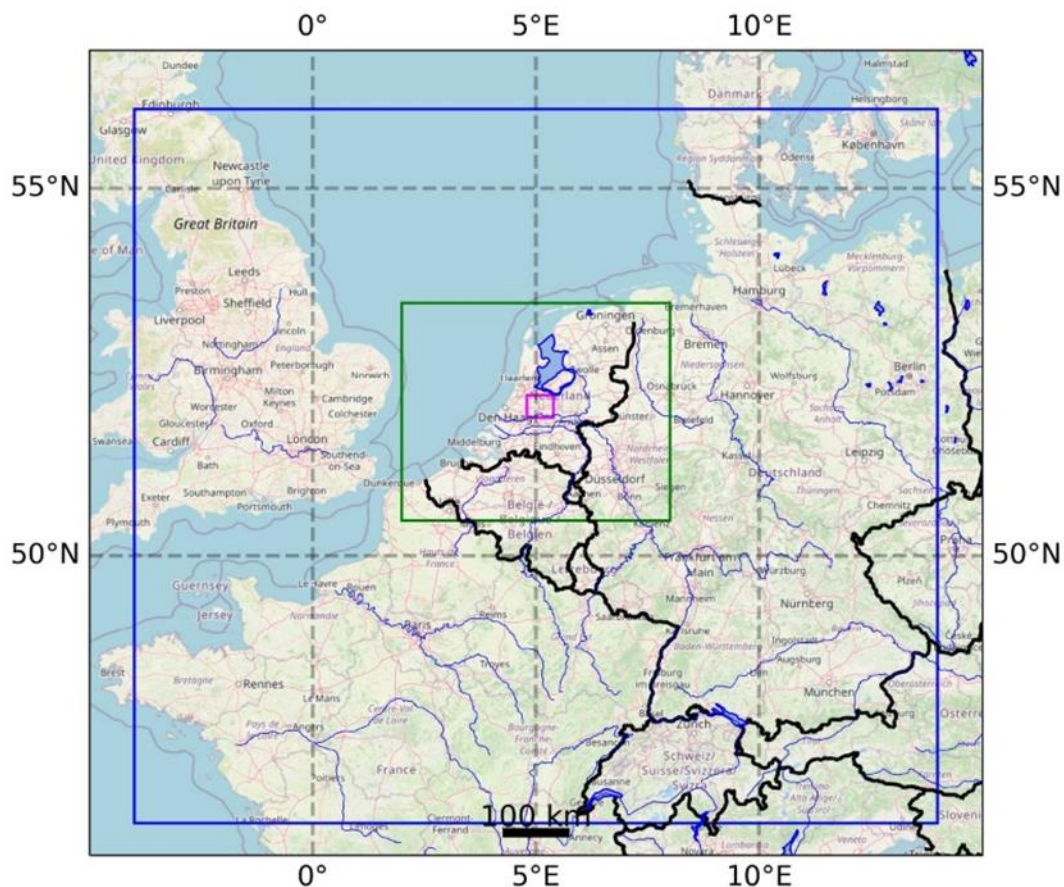
Het LOTOS-EUROS-model is een Euleriaans chemietransportmodel dat luchtvervuiling in de lagere troposfeer simuleert. De fysieke processen van het model omvatten advectie, diffusie, droge en natte afzetting, chemische reacties en sedimentatie. LOTOS-EUROS wordt gevoed door emissies. Deze emissies zijn verdeeld over het jaar tot emissiehoeveelheden per uur per type bron door gebruik te maken van emissieprofielen (maandelijks, dagelijks en per uur).

Deze profielen zijn gebaseerd op statistieken. De in dit onderzoek gebruikte emissies zijn gebaseerd op de standaard temporele profielen uit de TNO-MAC-II-inventaris (TNO-Monitoring Atmospheric Composition and Climate) (Kuenen, J.J.P., et al. 2014). Het model wordt aangestuurd door meteorologische gegevens verkregen met een ruimtelijke resolutie van 7 km x 7 km van het Integrated Forecasting System (IFS) van het European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF). Om door metingen van de luchtkwaliteit gekalibreerde modelsimulaties uit te kunnen voeren wordt een data-assimilatietechniek gebruikt. Binnen LOTOS-EUROS is een data-assimilatiesysteem geïmplementeerd op basis van de Ensemble Kalman Filter (EnKF)-techniek in navolging van Shin et al. (2016). Het assimilatiesysteem binnen LOTOS-EUROS is in verschillende onderzoeken gebruikt, waarbij gebruik werd gemaakt van satellietmetingen (van der Graaf, S. et al. 2022) of metingen op de grond (Lopez-Restrepo et al. 2020). Bovendien assimileert LOTOS-EUROS op dagbasis metingen van officiële meetstations in heel Europa binnen de operationele producten van de Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS, <https://atmosphere.copernicus.eu/>). Skoulidou et al. (2024) voerden verschillende assimilatie-experimenten uit in de regio Eindhoven waarbij waarnemingen van verschillende kwaliteitsniveaus (referentieapparatuur en sensoren) zijn gecombineerd.

In dit project worden modelberekeningen uitgevoerd in een geneste domeinconfiguratie zoals weergegeven in Figuur 2.4, gelijkend aan Skoulidou et al. (2024). Om een berekening met hoge resolutie over het projectgebied (dat wil zeggen de Provincie Utrecht) te realiseren, zijn drie verschillende domeinen gedefinieerd. De configuratie van de domeinen wordt weergegeven in Tabel 2.1. Domein 1 (D1 - blauwe kleur) is het grootste domein en heeft de laagste resolutie (0,25°x0,25°). De randvoorwaarden in D1 worden verkregen door het Copernicus Atmosphere Monitoring Service global Near Real Time product (CAMS NRT, <https://atmosphere.copernicus.eu/>, laatste toegang: 18/7/2024). Domein 2 (D2 - groene kleur) heeft een resolutie van 0,10°x0,10° en is geconfigureerd om de concentraties van D1 als randvoorwaarden te gebruiken en omvat stedelijke gebieden zoals Brussel, Düsseldorf en Amsterdam en Rotterdam. De a priori antropogene emissies die in D1 en D2 worden gebruikt zijn verkregen uit de CAMS-Regionaal Europese emissies (CAMS REG) voor het jaar 2017 (Kuenen et al. 2022). De ruimtelijke resolutie van de inventaris is 0,10°x0,05° (ongeveer 5 km x 5 km). Domein 3 (D3 - paarse kleur) is het kleinste domein en heeft een resolutie van 0,01° x 0,01° en omvat de Provincie Utrecht. De apriori antropogene emissies die in D3 worden gebruikt, zijn afkomstig uit de Nederlandse emissieregistratie (<http://www.emissieregistratie.nl/>, laatste toegang: 19/11/2021), gebaseerd op jaartal 2018 bij een ruimtelijke horizontale resolutie van 0,01°x0,01°.

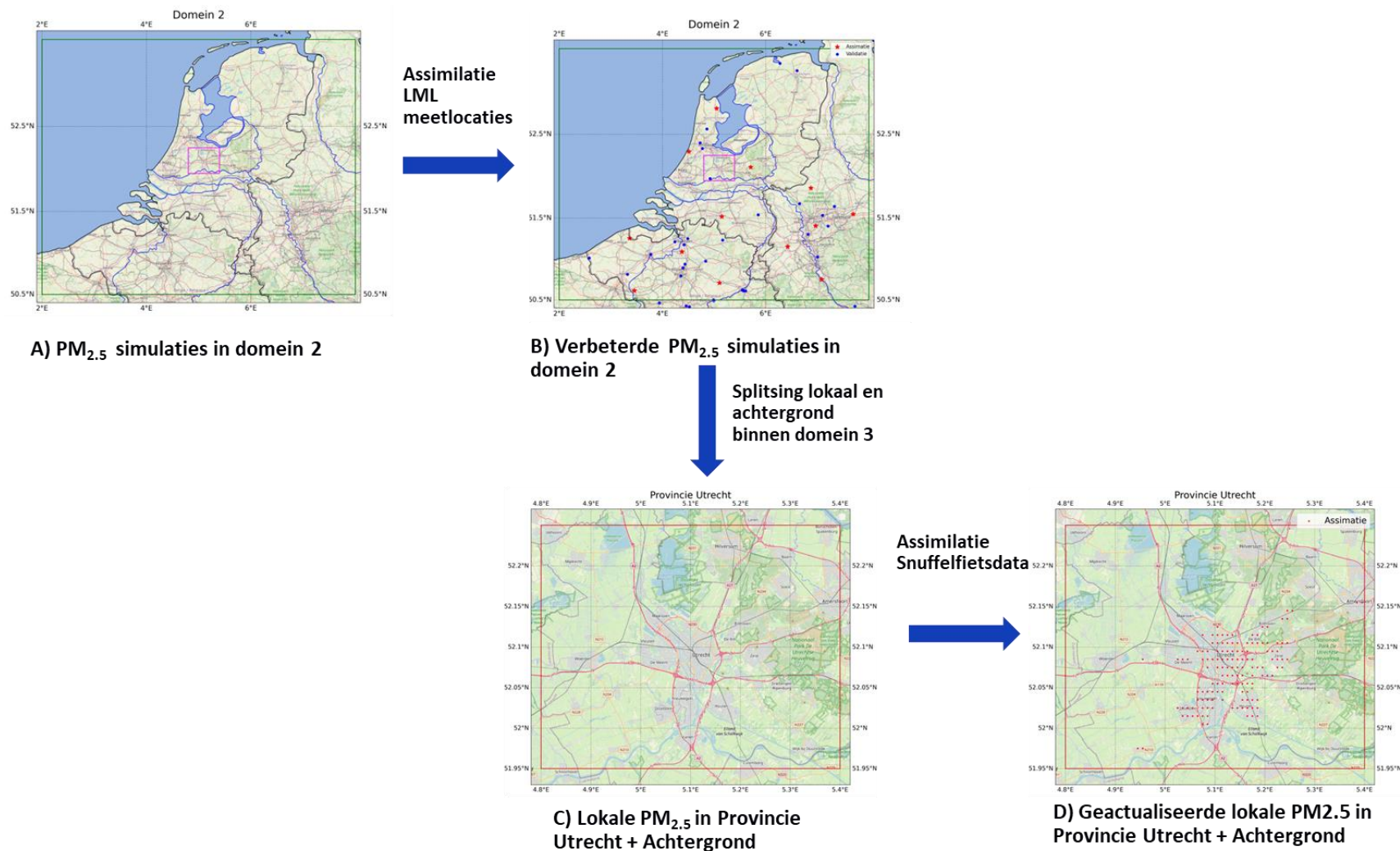
Tabel 2.1: Beschrijving van modeldomeinen

Domein	Ruimtelijke dekking	Ruimtelijke resolutie	Gebruikte Emissieinventarisatie	Grenscondities
Domein 1 – D1 (blauw)	-4°E - 14°E, 46°N - 56°N	0.20°x 0.10°	CAMS REG (0.10° x 0.05°)	CAMS NRT (~35km x 35 km)
Domein 2 – D2 (groen)	2°E - 8°E, 50.5°N - 53.5°N	0.10°x0.05°	CAMS REG (0.10° x 0.05°)	Domein 1 – D1 (blauw)
Domein 3 – D3 (paars)	4.8°E – 5.4°E, 51.95°N - 52.25°N	0.01°x0.01°	Emissieregistratie (0.01° x 0.01°)	Domein 2 – D2 (groen)



Figuur 2.4: Domeinen voor de geneste configuratie van de LOTOS-EUROS modelberekeningen.

Het stroomdiagram in Figuur 2.5 beschrijft de stappen die in dit onderzoek zijn gevolgd om de modelberekeningen met de verschillende soorten metingen te kalibreren. Simulaties van het model binnen domein 2 (D2) worden gecombineerd met metingen van officiële meetstations en zorgen voor verbeterde PM_{2.5}-concentraties binnen domein 2. De stations weergegeven als rode stippen in Figuur 2.5B worden gebruikt voor het assimilatieproces. De blauwe stippen zijn de stations die worden gebruikt voor de evaluatie van het proces. Deze zijn onafhankelijk van de assimilatiestap. In de derde stap worden de verbeterde PM_{2.5} concentraties van domein 2 gebruikt als randcondities voor domein 3 (Provincie Utrecht). Hierdoor wordt de bijdrage van PM_{2.5} afkomstig uit gebieden buiten de Provincie verbeterd waardoor er in meer detail gekeken kan worden naar de emissies binnen de Provincie. In deze stap worden PM_{2.5}-simulaties afkomstig van lokale emissies gescheiden van de achtergrondsimulaties. In de vierde stap assimileren we, om meer inzicht te krijgen in lokale emissies, de verwerkte metingen van de Snuffelfiets-sensoren, zoals beschreven in paragraaf 3.3. De pixels met een hogere beschikbaarheid van metingen tijdens de periode van het onderzoek worden in aanmerking genomen voor het assimilatieproces en staan weergegeven met de rode stippen in de laatste stap (Figuur 2.5D).



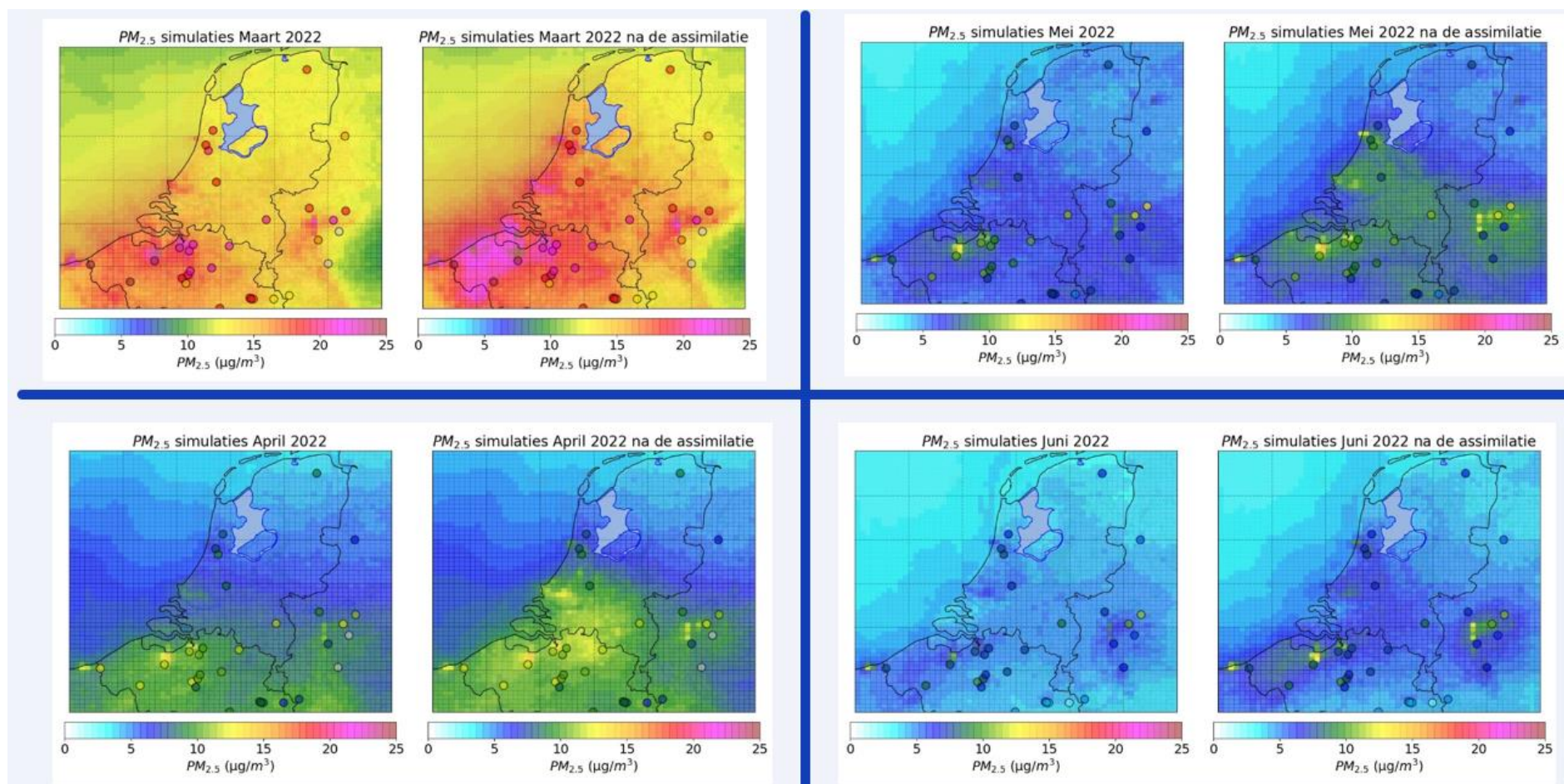
Figuur 2.5: Stroomdiagram van de stappen die zijn gevolgd voor de kalibratie van de modus met behulp van verschillende soorten metingen.

3 Modelleren met referentiestations

3.1 Nationale achtergrond

Metingen van de officiële stations in Nederland, België en Duitsland gebruikt om de modelberekeningen van PM_{2.5} binnen domein 2 te kalibreren en te corrigeren. Dit is een belangrijke stap omdat de modeluitkomsten van domein 2 worden gebruikt als randcondities voor domein 3 (de Provincie Utrecht). Deze randvoorwaarden zijn ook een van de onzekerheden in het model (Skoulidou et al. 2024). Alleen officiële stations die als achtergrond worden gekenmerkt en daarmee representatief zijn voor achtergrondconcentraties rekening houdend met de relatief lage ruimtelijke resolutie, worden geassimileerd en gebruikt om de simulaties in domein 2 te kalibreren. Assimilatiestations worden zo geselecteerd dat ze goed over het domein verdeeld zijn (rood in Figuur 2.5 B). Er zijn 10 stations buiten Nederland gebruikt om de grensoverschrijdende vervuiling in beeld te brengen. Binnen Nederland zijn 4 beschikbare achtergrondstations buiten de regio Utrecht geselecteerd welke de omgeving om de provincie heen representeren. Een selectie van achtergrondstations, welke niet worden gebruikt tijdens het assimilatieproces, worden gebruikt om de simulaties voor en na de assimilatie te valideren (blauw in Figuur 2.5 B).

De maandgemiddelde concentratie PM_{2.5} in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, gesimuleerd door het model voor en na de assimilatie van de officiële stations, wordt weergegeven in Figuur 3.1 voor maart, april, mei en juni 2022. Hogere PM_{2.5}-concentraties worden getoond in maart en lager voor de maanden april, mei en juni. De simulaties onderschatten in de meeste gevallen de waarden van de metingen die zijn gebruikt om onze resultaten te valideren. Deze metingen staan als stippen op de kaarten weergegeven, in dezelfde kleurenschaal als de modelresultaten. Als gevolg van de assimilatie worden de gesimuleerde concentraties gedurende alle vier de onderzochte maanden verhoogd. De grootste stijgingen zijn te zien in België en Zuid-Nederland. De statistieken van de vergelijking tussen de simulaties en de validatiestations tussen maart en juni zijn weergegeven in Tabel 3.1. In de tabel zijn alleen de gebruikte meetlocaties uit Nederland weergegeven. De statistieken zijn over het algemeen verbeterd. De gemiddelde afwijking is verlaagd van $-3,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (-31%) naar $-1,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (-16%) en de gemiddelde correlatiecoëfficiënt is verhoogd van 0,83 naar 0,89. De genormaliseerde wortelgemiddelde kwadratische fout (NRMSE) wordt verlaagd van 0,48 naar 0,34.



Figuur 3.1: Maandelijks gemiddelde PM_{2.5}-concentraties (links) en concentraties (rechts) na de assimilatie van officiële stations voor maart, april, mei en juni 2022. De stippen op de kaarten tonen de maandgemiddelde PM_{2.5} concentratie van de officiële stations die voor de validatie zijn gebruikt (stations in grijs betekent geen data).

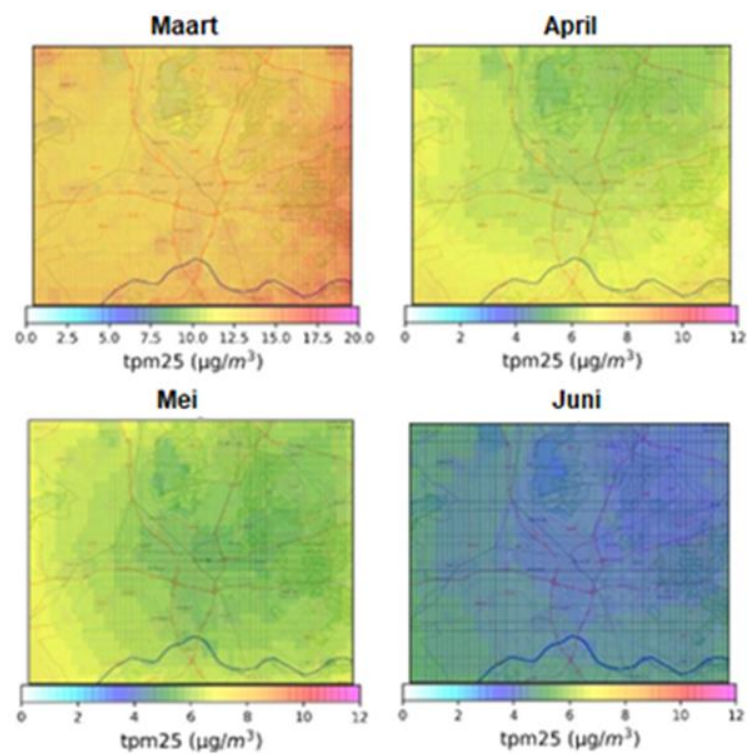
Tabel 3.1: Statistieken van modelsimulaties in domein2 voor en na de kalibratie met behulp van officiële stations voor de periode tussen maart en juni 2022. Er worden alleen statistieken van meetlocaties in Nederland getoond.

LML Meetlocatie	Correlatie door de tijd		Bias		Bias (%)		NRMSE	
	Model	Model + Metingen	Model	Model + Metingen	Model	Model + Metingen	Model	Model + Metingen
NL00131 / Vredepeel-Vredeweg	0.81	0.87	-4.69	-3.07	-36	-23	0.46	0.34
NL00556 / De Rijk-Oostdijkje	0.86	0.93	-3.27	-1.77	-32	-17	0.50	0.33
NL00561 / Amsterdam Sloteweg	0.86	0.93	-4.00	-1.80	-34	-15	0.46	0.27
NL00644 / Cabauw-Wielsekade	0.83	0.90	-2.76	-0.46	-25	-4	0.45	0.29
NL00703 / Amsterdam Spaarwoude	0.85	0.92	-2.61	-0.27	-24	-2	0.43	0.26
NL00938 / Groningen-Nijensteinheerd	0.77	0.78	-3.76	-3.65	-36	-35	0.59	0.57
Gemiddeld over alle stations	0.83	0.89	-3.52	-1.84	-31	-16	0.48	0.34

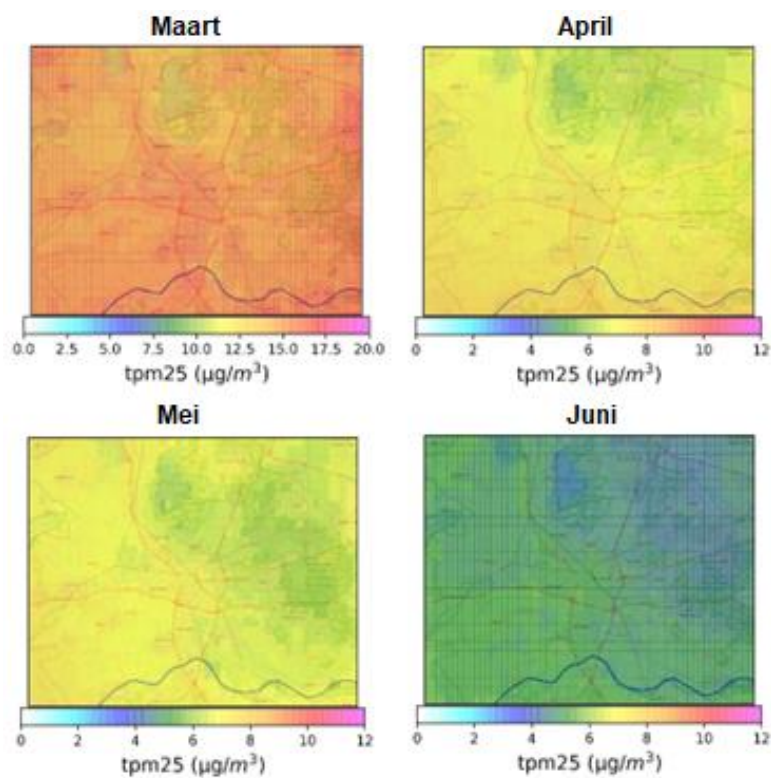
3.2 Provinciale achtergrond en lokale bijdrages (voor gebruik Snuffelfietsdata)

In deze sectie beschrijven we de uitkomsten van de derde stap van het proces, zoals getoond in Figuur 2.5C. Domein 3 bestrijkt hoofdzakelijk het gebied van de Provincie Utrecht. Om de lokale en achtergrondbijdragen van PM_{2.5} in de provincie te scheiden, hebben we de bronverdelingstechniek (labels) gebruikt die in het LOTOS-EUROS-model is geïmplementeerd. Met bronverdeling kan de herkomst van fijnstofcomponenten en de precursorgassen ervan worden gevolgd (Timmermans, R., 2017). Labelruns kunnen de concentraties labelen, en daardoor volgen, die afkomstig zijn vanaf de grens van het gebied (vanaf nu achtergrond genoemd) en de concentraties afkomstig van verontreinigende stoffen die binnen Domein 3 worden uitgestoten (vanaf nu lokaal genoemd).

De maandelijkse gemiddelde achtergrondconcentraties van PM_{2.5} zoals berekend voor de provincie Utrecht in maart, april, mei en juni 2022 zijn weergegeven in Figuur 3.2. De bijbehorende totale gesimuleerde concentraties zijn weergegeven in Figuur 3.3. Alle getoonde kaarten geven de modelresultaten weer zonder dat snuffelfietsdata is geïntegreerd in de modellering. Wel zijn de aanpassingen zoals beschreven in de vorige sectie meegenomen: de gebruikte randcondities zijn de gecorrigeerde concentraties uit domein 2 (gekalibreerd met metingen van officiële stations) zoals beschreven in sectie 3.1 en weergegeven in Figuur 2.5B.



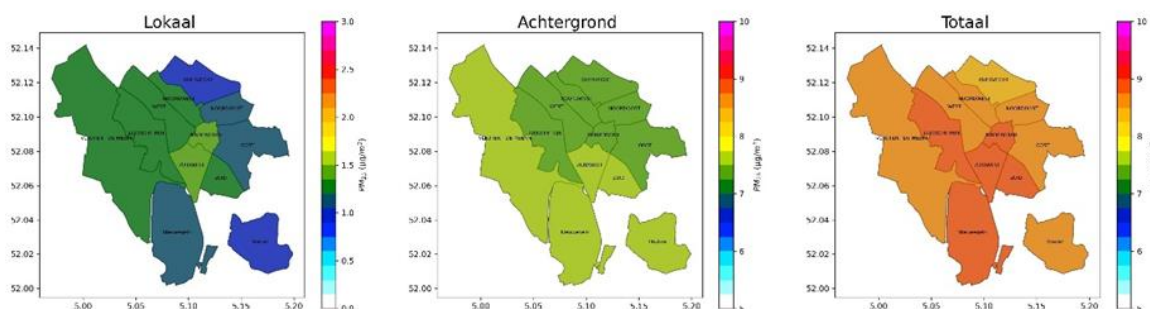
Figuur 3.2: Maandgemiddelde achtergrondconcentraties PM2.5 binnen de provincie Utrecht voor maart, april, mei en juni 2022.



Figuur 3.3: Maandelijks gemiddelde totaal PM2.5 zonder assimilatie Snuffelfietsdata van de provincie Utrecht voor maart, april, mei en juni 2022. Let op de verschillende limieten in de kleurenbalk.

In maart 2022 werd PM2.5 afkomstig uit achtergrondgebieden buiten de provincie Utrecht geschat op $\sim 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ met iets hogere concentraties in het oosten en zuiden van het domein. De lokale bijdragen in de provincie Utrecht, zoals gesimuleerd door het model en op basis van a priori emissie-informatie, zijn het hoogst in het midden en westen van het domein en tussen $1,5$ en $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, terwijl ze in het oosten van het domein lager zijn en tussen de $0,2$ en $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (5-10% van het totaal PM2.5) liggen. In april is het totaal PM2.5 over het algemeen lager dan in maart, zowel op basis van lokale als achtergrondbijdragen. De ruimtelijke verdeling is echter vergelijkbaar, met een hogere lokale bijdrage aan PM2.5 in het zuidwesten van het domein. De gemiddelde achtergrondbijdragen in april zijn veel lager met een gemiddelde waarde over het domein van circa $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lokale bijdragen zijn gemiddeld goed voor $\sim 10\%$ van de totale PM2.5 concentraties in het domein. In mei is de lokale bijdrage aan PM2.5 hoger dan in april, terwijl de achtergrondbijdragen iets lager zijn, wat zicht uit in hogere PM2.5 concentraties in het westen van het domein. De gemiddelde lokale bijdrage aan PM2.5 in mei is verantwoordelijk voor ongeveer 11%. In juni zijn de achtergrondbijdragen veel lager en liggen tussen de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, terwijl de lokale PM2.5 bijdrages over het domein gemiddeld 9% bedragen.

Verder berekenden we de gemiddelde lokale, achtergrond- en totale PM2.5 per stadsdeel in de gemeente Utrecht (10 stadsdelen) en voor Nieuwegein en Houten. Deze vergelijkingen worden in de volgende hoofdstukken gebruikt om de effecten van de integratie van Snuffelfietsdata in de modellering te duiden. De gemiddelde PM2.5 concentraties tussen maart en juni 2022 zijn weergegeven in Figuur 3.4. De gemiddelde totale concentratie is te zien, alsmede de uitsplitsing tussen de achtergrond en lokale bijdrage. De achtergrondconcentratie PM2.5 is hoger in de zuidwestelijke deelgebieden (rond de $7,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ten opzichte van de noordoostelijke deelgebieden. Aan de andere kant vertoont de geschatte lokale bijdrage aan PM2.5 grotere variaties tussen de deelgebieden. De stadsdelen Binnenstad en Zuidwest laten lokaal de hoogste bijdrages aan PM2.5 zien ($\sim 1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), terwijl Houten en Overvecht de laagste bijdrages tonen ($\sim 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$).



Figuur 3.4: Gemiddelde PM2.5 concentraties gerelateerd aan lokale bronnen (links), achtergrond (midden) en totaal over 10 stadsdelen van de gemeente Utrecht en de twee gemeenten Nieuwegein en Houten (rechts) tussen maart en juni 2022.

4 Modelleren met snuffelfietsdata

Na de kalibratie en voorbewerking van de Snuffelfietsdata zoals beschreven in paragraaf 2.1 en Appendix A, worden de gegevens gebruikt om de lokale bijdrage aan de concentraties en de daaraan verbonden lokale emissies in de provincie Utrecht te actualiseren. Omdat de gemodelleerde achtergrondconcentraties al zijn verbeterd via metingen van officiële stations (zoals beschreven in hoofdstuk 3), wordt aangenomen dat de aanpassingen voorkomend uit integratie van de Snuffelfietsdata vooral komen door aanpassingen in de lokale concentraties en emissies.

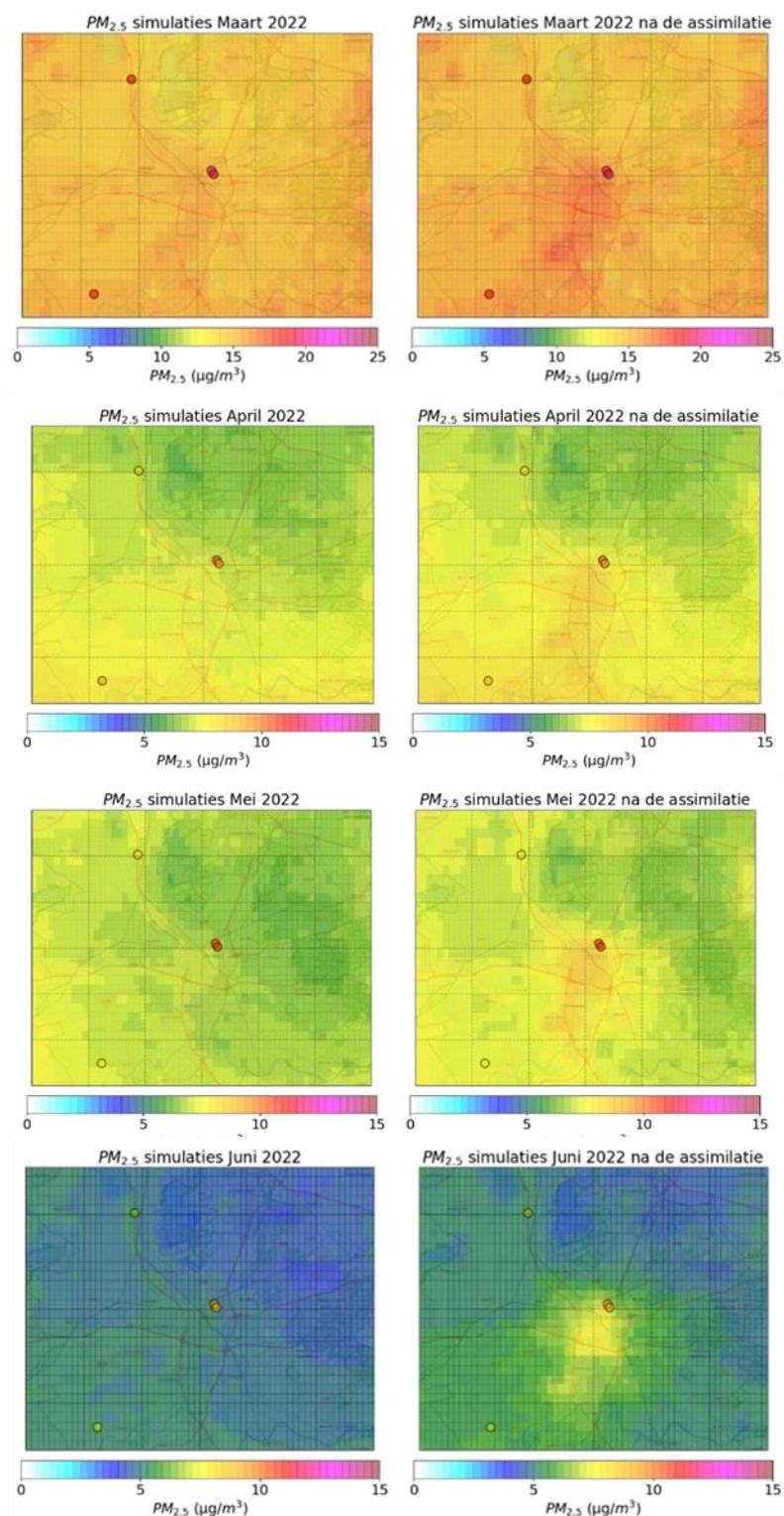
4.1 Vergelijking modelresultaten en metingen

De berekende maandelijks gemiddelde PM2.5 concentraties voor en na de assimilatie van Snuffelfiets-metingen worden weergegeven in Figuur 4.1, samen met de PM2.5-concentraties gemeten door de officiële stations in de regio. De metingen van de officiële stations in de provincie Utrecht (Tabel 4.1) worden gebruikt om onze resultaten te evalueren. Alleen de stedelijke stations NL00636 Kardinaal de Jongweg (gericht op verkeer) en NL00643 Griftpark (stedelijke achtergrond) bevinden zich op locaties waar Snuffelfietsdata beschikbaar is. Beide LML stations meten altijd hogere concentraties dan de initiële modelsimulaties. Voor assimilatie is het verschil ongeveer $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (~31%) tussen de modelresultaten en de metingen, terwijl na de assimilatie met de Snuffelfietsdata dit afneemt tot $\sim 2,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (~22%) (zie ook Tabel 4.1). Dat betekent een reductie van 30% in het verschil tussen modelresultaten en de officiële metingen. Per maand verschilt het beeld:

- › In maart is het verschil tussen de modelresultaten voor assimilatie en de metingen op de officiële stations ongeveer -22%. Na de assimilatie is dit -18%.
- › Het verschil in PM2.5 tussen model en metingen vóór en na de assimilatie in april is respectievelijk -28% en -22%.
- › In mei is de initiële onderschatting -37%. Na de assimilatie van de Snuffelfietsdata daalt dit naar -25%.
- › De onderschatting van de metingen is in juni -47%. Na de assimilatie van de Snuffelfietsdata is dit verschil afgenomen naar -27%.

De gemiddelde correlatiecoëfficiënt tussen de metingen en het model is na de assimilatie gelijkend (0,88 om 0,87). De NRMSE daalt van 0,40 naar 0,33. Er is een resterend verschil van ongeveer 22% tussen de gemodelleerde concentraties en metingen. Dit kan verschillende verklaringen hebben. De onzekerheden in de sensormetingen van de Snuffelfiets zelf zijn relatief groot (zie ook Appendix A). Daarnaast kunnen verschillen tussen metingen en modeluitkomsten ook het gevolg zijn van modelonzekerheden (zoals onzekerheden in meteorologische input, parametrisaties, chemie enz). Ook is er een ruimtelijk verschil tussen de modeluitkomsten en metingen. Elke pixel uit het modelresultaat is representatief voor de concentraties PM2.5 in een gebied van ongeveer 1x1km. Hier zit een discrepantie ten

opzichte van de Snuffelfietsdata, welke metingen langs een traject vertoont, en met de LML meetlocaties welke op één specifiek punt meten.



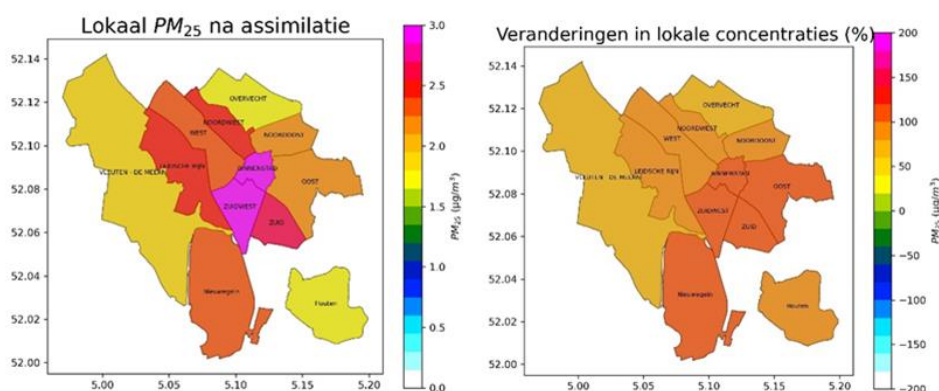
Figuur 4.1: Maandelijke gemiddelde modeluitkomsten van PM_{2.5} voor (links) en na (rechts) de assimilatie van Snuffelfietsdata voor maart, april, mei en juni 2022 (van boven naar beneden). De punten op de kaart laten de gemiddeld gemeten PM_{2.5} concentraties van de nabije LML stations zien.

Tabel 4.1: Statistieken van modeluitkomsten in de Provincie Utrecht voor en na de assimilatie met Snuffelfietsdata voor de periode tussen maart en juni 2022.

LML Meetlocatie	Correlatie Coëfficiënt		Bias		NRMSE	
	Model	Model + Snuffelfiets	Model	Model + Snuffelfiets	Model	Model + Snuffelfiets
NL00636/ Kardinaal de Jongweg	0.89	0.88	-4.07 (-32%)	-2.89 (-23%)	0.39	0.33
NL00643/ Griftpark	0.87	0.87	-3.79 (-31%)	-2.60 (-21%)	0.40	0.33
Gemiddelde	0.88	0.87	-3.93 (-31%)	-2.75 (-22%)	0.40	0.33

4.2 PM2.5 concentraties op lokaal niveau

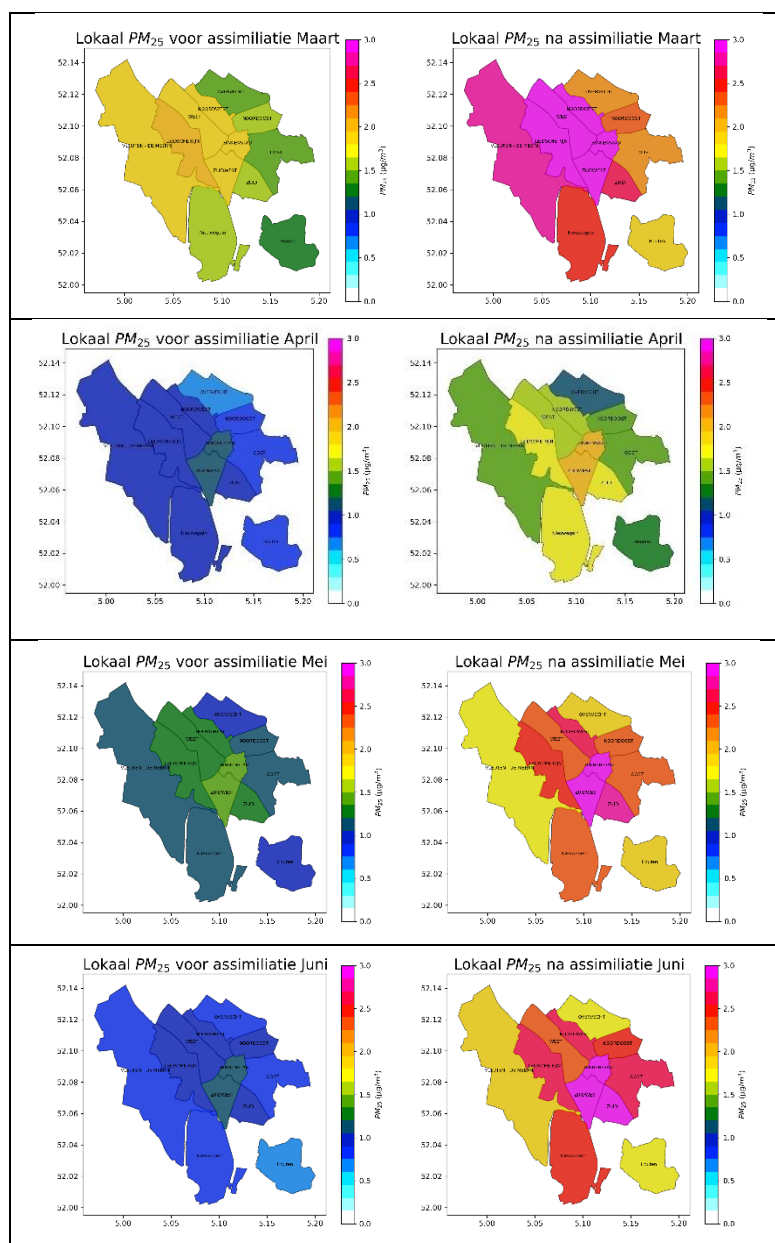
De concentraties PM2.5 bestaan uit een lokale bijdrage en een (regionale) achtergrond. Zoals eerder genoemd in dit hoofdstuk is de aanname dat het assimileren van de Snuffelfietsdata met name de lokale bijdrage bijstelt. De lokale concentraties zijn geschat door de berekende achtergrondconcentratie (zoals getoond in Figuur 3.2) van de totale concentratie na assimilatie van de Snuffelfietsdata (Figuur 4.1) af te trekken.



Figuur 4.2: Links: Gemiddelde PM2.5 uit lokale bronnen (links) na de assimilatie van Snuffelfietsen over de 10 stadsdelen in Utrecht en de twee gemeenten Nieuwegein en Houten tussen maart en juni 2022. Rechts: Procentuele veranderingen van lokaal PM2.5 na de assimilatie van Snuffelfietsen.

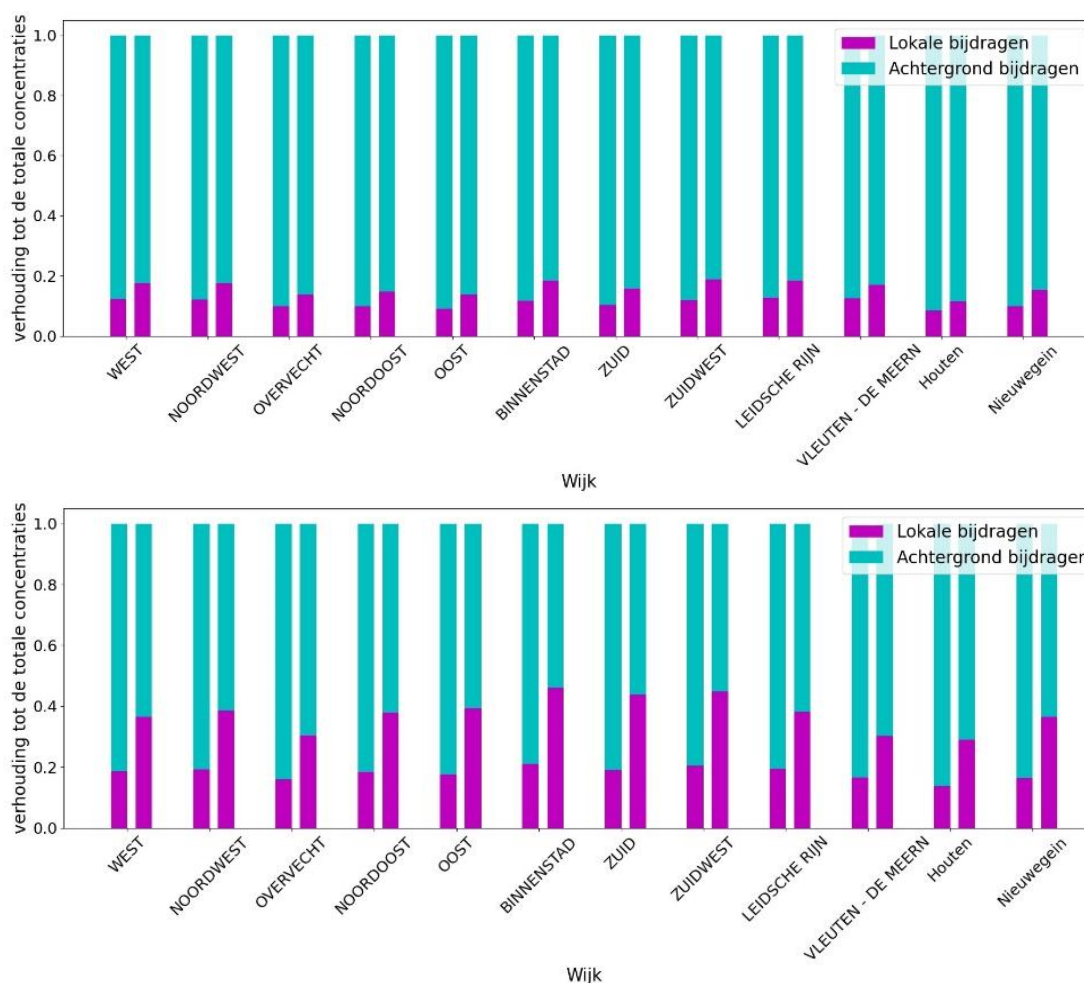
De nieuwe schatting van de lokale concentratiebijdrage PM2.5 voor de periode maart tot en met juni 2022, na assimilatie van de Snuffelfietsdata, alsmede de verandering hierin ten opzichte van de oorspronkelijke modelresultaten wordt weergegeven in Figuur 4.2. De originele lokale concentratiebijdrage PM2.5 is terug te vinden in Figuur 3.4. De kaarten laten zien dat de lokaal gemodelleerde bijdrage aan de PM2.5 concentraties over alle getoonde gebieden toeneemt. De stadsdelen Binnenstad en Zuidwest hebben de hoogste gemodelleerde lokale concentratiebijdrages (~rond de 3 µg/m³). Nieuwegein, Zuidwest, Zuid, Binnenstad en Oost laten een stijging zien van de lokale bijdrage aan PM2.5 van ongeveer 100% vergeleken met de initiële modelsimulaties, terwijl West, Noordwest, Noordoost, Leidsche Rijn en Houten stijgingen tussen de 80 en 90% laten zien. In de gebieden Vleuten-De Meern en Overvecht zijn stijgingen te zien van ongeveer 60 tot 70%.

De maandgemiddelde lokale concentratiebijdrages, voor en na assimilatie, zijn weergegeven in Figuur 4.3. Zoals ook al zichtbaar Figuur 4.1 variëren de verschillen per maand. Wel gaan de gemodelleerde concentratiebijdrages structureel omhoog. De meest opvallende stijging is te zien in juni. Na assimilatie is de lokale bijdrage aan PM_{2.5} in alle subgebieden met ruim 1 µg/m³ toegenomen. De totale PM_{2.5} concentratie blijft tegelijkertijd lager dan in de andere gemodelleerde maanden. Dit suggereert dat lokale bijdragen aan PM_{2.5} in juni een groter deel van de totale concentraties uitmaken ten opzichte van de eerdere maanden in het jaar. In juni kennen de stadsdelen Binnenstad, Zuid en Zuidwest de hoogste lokale bijdrages, tot 3,5 µg/m³. Dit betekent een stijging ten opzichte van de initieel berekende concentraties van ruim 2 µg/m³. De PM_{2.5}-concentraties geassocieerd met lokale emissies in Binnenstad, Zuid en Zuidwest stijgen in juni van ~20% naar ~45% van de totale concentraties.



Figuur 4.3: Gemodelleerde maandgemiddelde lokale bijdrage aan PM_{2.5} concentraties zonder (links) en met Snuffelfietsdata (rechts) voor Utrecht, Nieuwegein en Houten.

In Figuur 4.4 worden de achtergrond- en lokale bijdragen aan PM_{2.5} in staafdiagram gepresenteerd. De bovenste figuur laat de vergelijking zien voor maart, de onderste voor juni. De stadsdelen Leidsche Rijn, Vleuten – De Meern, West en Noordwest laten in maart, vóór de assimilatie, de hoogste lokale bijdrage aan de PM_{2.5} concentraties zien (ruim 12%). Na de assimilatie laten de stadsdelen Zuidwest, Binnenstad en Leidsche Rijn de hoogste lokale bijdragen zien (ruim 18%). Houten vertoont de laagste lokale bijdragen vóór (~8%) en na de assimilatie van Snuffelfietsdata (11%). De bijstelling van de lokale bijdrage is in juni aanzienlijk hoger. Binnenstad, Zuidwest, Leidsche Rijn, Noordwest en Zuid laten vóór de assimilatie de hoogste lokale bijdragen zien (ruim 19%), terwijl Binnenstad, Zuidwest en Zuid na de assimilatie van Snuffelfietsen lokale bijdragen van ruim 40% laten zien.

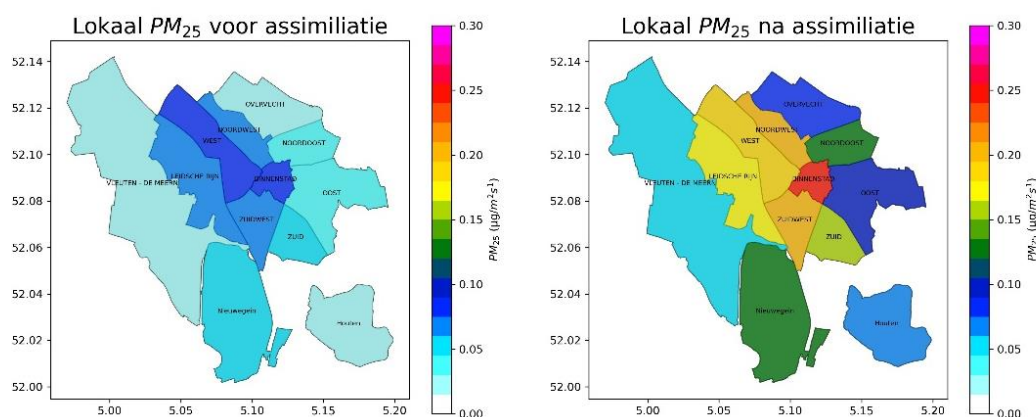


Figuur 4.4: Staafdiagram van de verhouding tussen lokale (in paars) en achtergrond (in cyaan) concentraties voor alle buurten in maart (boven) en juni (onder) 2022. De linkerbalk laat de originele modelresultaten zien, terwijl de rechterbalk de modelresultaten laat zien met assimilatie van Snuffelfietsdata.

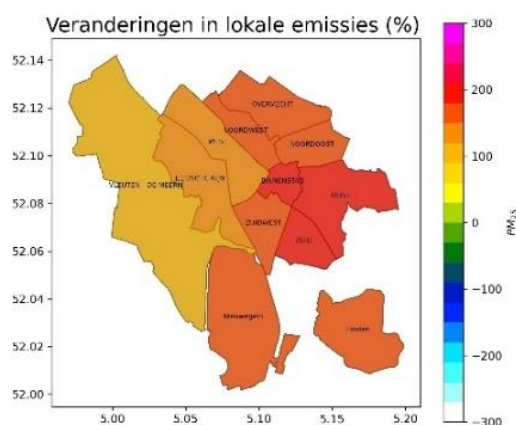
Dit laat zien dat de er variatie zit in de aanpassing veroorzaakt door assimilatie van Snuffelfietsdata per deelgebied. Van belang is wel dat de beschikbaarheid van metingen varieert: het aanbod voor metingen, veroorzaakt door wanneer wel en niet mensen met de Snuffelfiets fietsen, varieert over de tijd en is ongelijk verdeeld over de deelgebieden. In de stadsdelen Oost, Noordoost en Binnenstad, alsmede Houten en Nieuwegein was er tussen maart en juni voor ruim 40% van de totale uren minimaal één beschikbare meting binnen hun domein. Voor de stadsdelen Leidsche Rijn, Noordwest, Vleuten-de Meern en West is dit minder dan 25%.

4.3 PM2.5 emissies op lokaal niveau

De resultaten getoond in hoofdstuk 4.2 suggereren dat het model hogere lokale emissies nodig heeft om de gemeten concentraties te bereiken. Dit is met name zichtbaar in juni. In Figuur 4.5 en Figuur 4.6 worden de veronderstelde veranderingen in de uitstoot van PM_{2.5} weergegeven na de assimilatie van Snuffelfietsdata. De modellering suggereert dat de uitstoot tussen maart en juni 2022 zo'n 90 tot 190% groter zou moeten zijn om de berekende concentraties te verklaren. In de stadsdelen Binnenstad en Oost zijn de grootste stijgingen te zien (~185%), in Vleuten-de Meern de laagste (~95%).



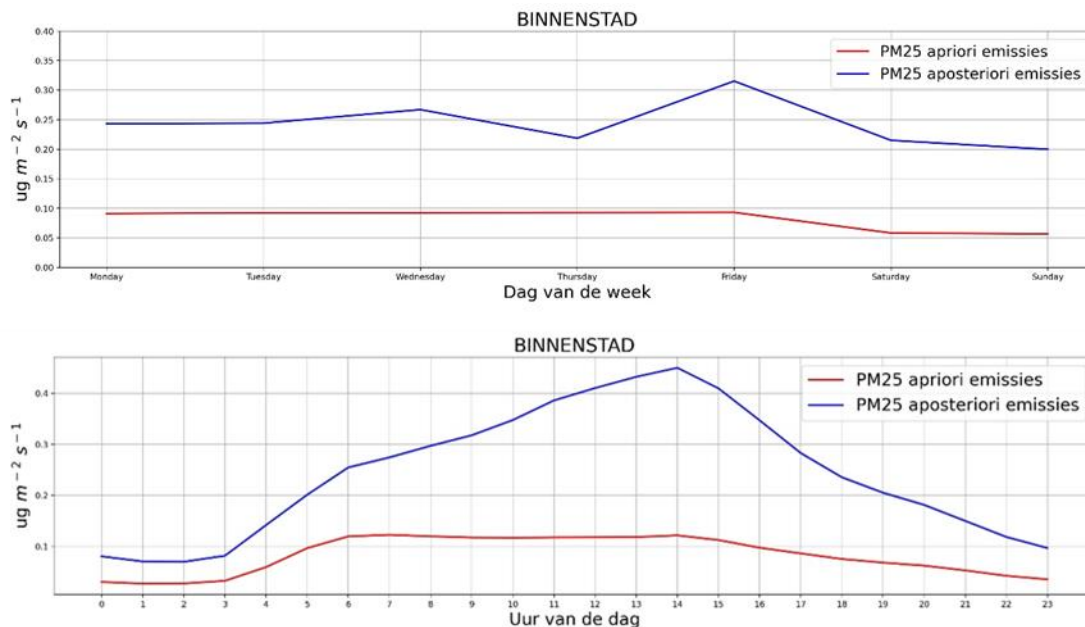
Figuur 4.5: Links: Gemiddelde PM2.5 uitstoot (links) over Utrecht, Nieuwegein en Houten tussen maart en juni 2022. Rechts: Idem na assimilatie Snuffelfietsen.



Figuur 4.6: Procentuele veranderingen van de lokale PM2.5-uitstoot na de assimilatie van snuffelfietsen tussen maart en juni 2022.

Het dagelijkse en wekelijkse profiel van de berekende PM_{2.5} emissies voor (apriori - rood) en na data assimilatie (aposteriori - blauw) in het stadsdeel Binnenstad wordt weergegeven in Figuur 4.7. Uit de apriori profielen blijkt dat de PM_{2.5}-emissies tussen 5 en 16 UTC hoger zijn, wat een ochtend- en een middagpiek laat zien. Aposteriori-profielen suggereren dat de emissies met name overdag hoger zijn dan in de initiële emissieinventarisatie en dat de ochtendpiek lager is dan de middagpiek. De waarden in de vroege ochtend en de late avond vertonen geen belangrijke veranderingen en benaderen de apriori-profielen. Dit wordt waarschijnlijk mede veroorzaakt doordat er tijdens deze tijdstippen weinig tot geen

Snuffelfiets-metingen beschikbaar zijn. Het aposteriori profiel suggereert daarnaast dat de emissies hoger zijn op alle dagen van de week. Ook zijn hierbij verschillen zichtbaar per dag, met donderdag wat lagere waarden en vrijdag juist wat hogere.



Figuur 4.7: Dag- en weekprofiel van a priori (rood) en a posteriori (blauw) voor de Binnenstad.

Een van de doelen in dit project was te onderzoeken of Snuffelfietsdata via de modellering meer kan zeggen over lokale bijdrages van verkeer aan PM2.5, en via die route informatief kan zijn aan het mobiliteitsbeleid van de Provincie. De resultaten van het project laten zien dat de combinatie van snuffelfietsen en modellering in ieder geval informatief kan zijn aan het verder in beeld brengen van PM2.5 concentraties, en daaraan vasthangende emissies, op lokaal niveau. Het onderscheid tussen of dit afhankelijk is van emissies van verkeer, danwel of andere lokale bronnen een grotere rol spelen, is lastiger te maken. Er is daarbij binnen dit project geen informatie beschikbaar geweest over het verkeer zelf, zoals verkeerstellingen.

Wellicht is wel een combinatie te maken met een aanpak waarbij de metingen zelf ook specifiek worden onderzocht op variaties op een hogere ruimtelijke schaal. De in dit onderzoek gesuggereerde hogere lokale bijdrage aan PM2.5-concentraties en emissies, vooral in de stadsdelen rond het centrum van Utrecht, komen bijvoorbeeld in grote lijnen overeen met de resultaten van Wesseling, J et al. (2021). Hier werd de blootstelling van mensen aan verkeersgerelateerde vervuiling onderzocht met Snuffelfietsdata van het jaar 2020. Voor de binnenstad van Utrecht zien we bijvoorbeeld overeenkomende resultaten als het gaat om verhoogde PM2.5 concentraties tussen beide studies. Waarschijnlijk is het wel zo dat naast verkeer ook andere bronnen van belang zijn. Inmiddels zijn in en rondom het centrum van Utrecht enkel schone auto's toegestaan en is met name in de binnenstad zelf het verkeer beperkt. Andere bronnen zijn daarmee waarschijnlijk ook zichtbaar in de metingen van de Snuffelfietsen, zoals huishoudelijke emissies (voor bijvoorbeeld verwarming) en emissies gerelateerd aan horeca. Daarnaast kunnen hogere concentraties niet alleen te wijten zijn aan hogere emissies, maar spelen mogelijk ook andere factoren een rol. Als gevolg van de gebouwencomplexen in het stadscentrum is er wellicht minder ventilatie waardoor luchtvervuilende stoffen langer blijven hangen. Dit street canyon-effect kan mede leiden tot hogere concentraties luchtvervuilende stoffen (Yuan et al., 2014).

5 Conclusies en aanbevelingen

In deze studie zijn de mogelijkheden voor een monitoringsysteem dat mobiele metingen vanuit snuffelfietsen combineert met luchtkwaliteitsmodellering onderzocht. De verzamelde mobiele meetdata van de snuffelfietsen zijn gebruikt om het luchtkwaliteitsmodel LOTOS-EUROS te kalibreren via een data assimilatie techniek. Daarnaast zijn ook meetgegevens van de meetlocaties van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit gebruikt om achtergrondconcentraties PM2.5 beter in beeld te brengen. De vraag hierbij was of meetgegevens van Snuffelfietsen aanvullende inzichten konden geven over de lokale PM2.5 concentraties en de bronnen die daaraan bijdragen. De periode maart tot en met juni 2022, vanwege de beschikbaarheid van voldoende Snuffelfietsdata, is onderzocht. De conclusies van dit onderzoek suggereren dat:

Vergelijking modelresultaten en metingen na assimilatie:

- › Het gebruik van meetgegevens van de officiële meetlocaties van Nederland, België en Duitsland in de modellering verbetert de LOTOS-EUROS modelresultaten. De afwijking in de modelresultaten neemt af van $-3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (-31%) naar $-1,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (-16 %) en de correlatiecoëfficiënt steeg van 0,83 naar 0,89. De resultaten van deze modelberekeningen worden gebruikt als achtergrond voor de berekening over de Provincie Utrecht waarbij Snuffelfietsdata wordt gebruikt.
- › De verwerking van Snuffelfietsdata in de modellering slaagt erin om gemiddeld zo'n 30% van de resterende verschillen tussen de metingen van de officiële meetlocaties in de stad Utrecht en de modelresultaten weg te nemen. Het overgebleven verschil van 22% tussen de modeluitkomsten en de metingen van het LML kan verschillende oorzaken hebben, die zowel te maken hebben met onzekerheden in de Snuffelfietsdata als in de modelberekening.
- › Daarnaast vormt de beschikbaarheid van Snuffelfietsdata in ruimte en tijd een extra beperking. Afhankelijk van waar en wanneer gefietst wordt is er meer of minder meetdata beschikbaar om te verwerken in de modellering. Meer meetgegevens en beter verdeeld in ruimte en tijd kan helpen de modelresultaten te verbeteren.

Resultaten gemodelleerde PM2.5 concentraties en emissies na assimilatie:

- › De gemodelleerde achtergrondconcentraties in de provincie Utrecht tussen maart en juni 2022 liggen tussen ~ 7 en $7,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dit staat gelijk aan ongeveer 85-90% van de totale gemodelleerde concentraties, voordat de Snuffelfietsdata wordt gebruikt.
- › De verwerking van Snuffelfietsdata zorgt ervoor dat de gemodelleerde totale concentraties PM2.5 toenemen. Deze toename wordt met name toegeschreven aan een grotere lokale bijdrage aan PM2.5 ten opzichte van de regionale achtergrond. De gemodelleerde bijdrage van lokale en achtergrond PM2.5 hangt af van de buurt en de tijd van het jaar. Lokale bijdragen worden met het gebruik van Snuffelfietsdata geschat op 17-28% van de totale concentratie PM2.5 (waar daarvoor 10-15% werd ingeschat).
- › In Nieuwegein en de stadsdelen Zuidwest, Zuid, Binnenstad en Oost van Utrecht geven de resultaten na het verwerken van Snuffelfietsdata een stijging weer van de lokale bijdrage aan PM2.5 concentraties van ongeveer $\sim 100\%$ vergeleken met de initiële

modelsimulaties. Voor de stadsdelen West, Noordwest, Noordoost, Leidsche Rijn en de gemeente Houten zijn stijgingen zichtbaar van 80 tot 90%. Voor Vleuten-De Meern en Overvecht is deze stijging ongeveer 60 tot 70%.

- › Met name in juni maken deze aangepaste lokale concentraties een groot verschil. Voor de verwerking van Snuffelfietsdata worden de lokale bijdragen geschat op ongeveer 20% van de totale PM2.5 concentratie, terwijl dit met Snuffelfietsdata rond de 40% ligt voor de verschillende deelgebieden. Het model suggereert dat de lokale bijdrage aan de PM2.5 concentratie in juni in de meeste wijken met ruim $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ toeneemt.
- › Na de verwerking van de Snuffelfietsdata suggereert het model dat de uitstoot over alle deelgebieden tussen maart en juni 2022 zo'n 90 tot 190% hoger zou moeten liggen dan de gebruikte emissieinventarisatie. De aanpassing is het grootst voor de stadsdelen Binnenstad en Oost (~185%), terwijl de in Vleuten-de Meern de laagste aanpassing wordt gesuggereerd (~95%).

De uitkomsten van het gebruik van Snuffelfietsdata in de modellering lijken daarmee te suggereren dat lokale bijdragen aan PM2.5 mogelijk belangrijker zijn dan blijkt uit de reguliere opzet van het model. Hiermee zou de mogelijke impact van lokale maatregelen voor de verbetering van de lokale luchtkwaliteit groter kunnen zijn dan wellicht eerder ingeschat. Met name rondom het stadscentrum van Utrecht voorspelt het model met Snuffelfietsdata hogere PM2.5 concentraties, met daarbij een hogere lokale component gevoed door lokale emissies. Dit hangt waarschijnlijk niet enkel samen met verkeer, aangezien het verkeer in dit deel van de stad beperkt is en valt binnen de milieuzone. Waarschijnlijk spelen ook andere bronnen een rol, zoals emissies van woningen of horeca. Ook kan het niet kunnen wegwaaien van vervuiling, in gebieden met hogere gebouwen, nauwe straatjes of veel bomen een rol spelen.

Deze studie laat zien dat de combinatie van meten, in dit geval referentiemetingen voor het bepalen van de regionale achtergrond en Snuffelfietsdata voor de lokale variaties, en modellering tot nieuwe inzichten en aanwijzingen kan leiden over de heersende luchtkwaliteit. Het specifiek onderbouwen van mobiliteitsbeleid in deze vorm lijkt lastig, omdat ook andere bronnen een rol kunnen spelen. Gegevens over de tijd van verkeersdrukte en verkeerssamenstelling binnen deelgebieden kan mogelijk hier verdere vorm aan geven.

6 Referenties

EEA, 2022. Air quality in Europe. Sources and Emissions of air pollutants in Europe. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/sources-and-emissions-of-air>. Accessed 3rd September 2024

EEA, 2024. Europe's air quality status 2024. <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2024>, Accessed 3rd September 2024

van der Graaf, S., Dammers, E., Segers, A., Kranenburg, R., Schaap, M., Shephard, M. W., et al. (2022). Data assimilation of CrIS NH₃ satellite observations for improving spatiotemporal NH₃ distributions in LOTOS-EUROS. *Atmos. Chem. Phys.* 22 (2), 951–972. doi:10.5194/acp-22-951-2022

[Hamanaka, R. B., Mutlu, G. M. \(2018\). Particulate matter air pollution: effects on the cardiovascular system. *Front. Endocrinol.* 9, 680. doi: 10.3389/fendo.2018.00680](#)

Hassani, A.; Castell, N.; Watne, Å.K.; Schneider, P. Citizen-operated mobile low-cost sensors for urban PM_{2.5} monitoring: Field calibration, uncertainty estimation, and application. *Sustain. Cities Soc.* 2023, 95, 104607.

Kuenen, J.J.P., Visschedijk, A.J.H., Jozwicka, M., Denier Van Der Gon, H.A.C., 2014. TNO-MACC-II emission inventory; A multi-year (2003-2009) consistent highresolution European emission inventory for air quality modelling. *Atmos. Chem. Phys.* 14 (20), 10963–10976. <https://doi.org/10.5194/acp-14-10963-2014>.

Lopez-Restrepo, S., Yance, A., Pinel, N., Quintero, O.L., Segers, A., Heemink, A.W., 2020. Forecasting PM₁₀ and PM_{2.5} in the aburra ´ valley (Medellín, Colombia) via EnKF based data assimilation. *Atmos. Environ.* 232, 117507 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117507>

[Parrado, C., Mercado-Saenz, S., Perez-Davo, A., Gilaberte, Y., Gonzalez, S., & Juarranz, A. \(2019\). Environmental stressors on skin aging. Mechanistic insights. *Frontiers in Pharmacology*, 10, 759. <https://doi.org/10.3389/fphar.2019.00759>](#)

Shin, S., Kang, J.S., Jo, Y., 2016. The local ensemble transform kalman filter (LETKF) with a global NWP model on the cubed sphere. *Pure Appl. Geophys.* 173 (7), 2555–2570. <https://doi.org/10.1007/s00024-016-1269-0>.

Skoulidou, I., Segers, A., Henzing, B., Zhang, J., Goudriaan, R., Koukouli, M. E., & Balis, D. (2024). Towards integration of LOTOS-EUROS high resolution simulations and heterogenous low-cost sensor observations. *Atmospheric Environment*, 120652, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120652>.

Timmermans, R., Kranenburg, R., Manders, A., Hendriks, C., Segers, A., Dammers, E., Zhang, Q., Wang, L., Liu, Z., Zeng, L., Denier van der Gon, H., Schaap, M., 2017. Source apportionment

of PM_{2.5} across China using LOTOS-EUROS. Atmos. Environ. 164, 370–386.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.06.003>.

Wesseling, J.; Hendricx, W.; de Ruiter, H.; van Ratingen, S.; Drukker, D.; Huitema, M.; Schouwenaar, C.; Janssen, G.; van Aken, S.; Smeenk, J.W.; et al. Assessment of PM_{2.5} Exposure during Cycle Trips in The Netherlands Using Low-Cost Sensors. Int. J. Environ. Res. Public Health **2021**, 18, 6007. <https://doi.org/10.3390/ijerph18116007>

WHO, 2022. WHO Ambient (outdoor) air pollution fact sheets [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health), Accessed 3rd September 2024

Yuan, Chao, Edward Ng, and Leslie K. Norford. Improving air quality in high-density cities by understanding the relationship between air pollutant dispersion and urban morphologies. Building and Environment 71 (2014),
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.10.008> 245-258.

Handtekening

TNO) Energy & Materials Transition) Utrecht, 23 oktober 2024

Sam van Goethem
Research manager

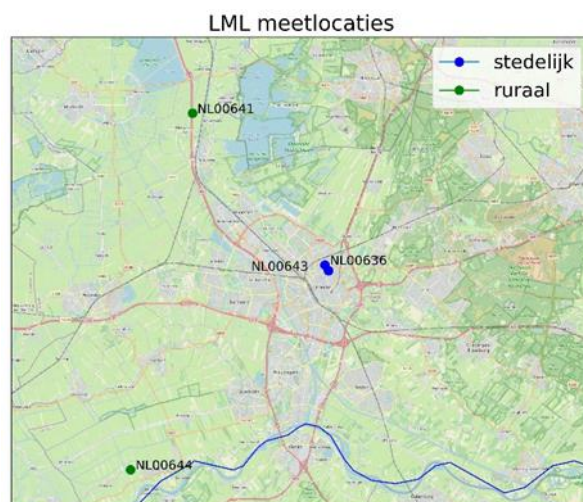
Ruben Goudriaan
Project manager

Appendix A

Vorbewerking Snuffelfietsdata

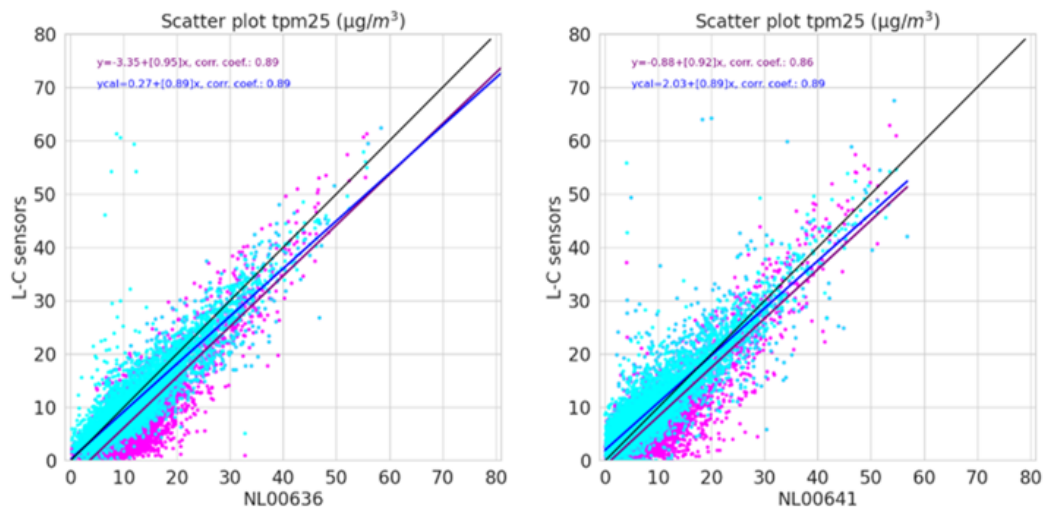
1. Filteren meetdata: De snuffelfietsdata is gefilterd op oneigenlijk gebruik, uitschieters of onregelmatig sensorgedrag. Metingen verkregen bij een zeer lage of hoge snelheid kunnen wijzen op oneigenlijk gebruik van de sensoren. Als gevolg hiervan zijn metingen uitgevoerd bij snelheden lager dan 5 km/uur dan wel hoger dan 45 km/uur uit de analyse verwijderd (gelijk aan Wesseling, J et al. (2021)). Daarnaast laten sommige sensoren continu zeer hoge waarden laten zien. Unieke kit-ID's die meer dan 50 keer meer dan 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ meten zijn verwijderd omdat dit als onrealistisch wordt beschouwd.

2. Kalibreren meetgegevens: Om de metingen van de sensoren te kalibreren gebruiken we PM2.5 data van het LML gebruikt van NL00641 (Breukelen), NL00644 (Cabauw - Wielsekade), NL00636 (Utrecht - Kardinaal de Jongweg) en NL00643 (Utrecht-Griftpark) (Figuur a.1). In dit onderzoek is dezelfde methode gevolgd als in Wesseling, J et al. (2021). Metingen van het LML worden vergeleken met metingen van de op dezelfde locatie geplaatste vaste sensoren waarmee een algemene correctiefactor per uur wordt berekend op basis van de verhoudingen tussen de officiële metingen en de metingen van de sensoren. De correctiefactor wordt alleen toegepast als er meer dan 1 correctiefactor, op basis van beschikbare meetgegevens van LML en de sensoren op deze locaties, beschikbaar is. De berekende kalibratiefactoren per uur worden vervolgens toegepast op de metingen met de mobiele sensor.



Figuur A.1: LML stations gebruikt voor de kalibratie van mobiele snuffelfietsdata

De spreidingsdiagrammen tussen de sensoren en de officiële stations NL00636 en NL00641 vóór (in paars) en na kalibratie (in cyaan) worden weergegeven in Figuur a.1. De sensormetingen vóór de kalibratie laten vooral bij lage concentraties, onder de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, een onderschatting zien ten opzichte van de officiële metingen. De onderschatting van de lagere concentraties wordt verminderd na toepassing van de kalibratiefactoren. Vóór de kalibratie worden gemiddelde sensorfouten gevonden van -4 en -1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De standaardafwijking van de fouten ligt tussen 3,8 en 5,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, de gemiddelde correlatiecoëfficiënt is 0,85 en de gemiddelde afwijking -2,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De gemiddelde sensorfouten na kalibratie zijn verlaagd tot ongeveer -1 en 1,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, de standaardafwijking ligt tussen 3,5 – 4,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, de gemiddelde correlatiecoëfficiënt is iets verhoogd naar 0,87 en de gemiddelde afwijking verlaagd naar 0,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Figuur A.1: Spreidingsgrafieken tussen de uurwaarden van de sensoren en de officiële stations vóór de toepassing van uurkalibratiefactoren (paars) en daarna (cyaan).

3. Toekennen meetonzekerheden voor verwerking in de data assimilatie: Voor verwerking van de sensordata in LOTOS-EUROS wordt een inschatting gemaakt van de onzekerheden van de metingen welke meegenomen worden in de data assimilatie. Deze bestaan uit een combinatie van de meetfout (e_m) en de representatiefout (e_r).

- De meetfout e_m wordt in het model als vast beschouwd en berekend door de vergelijking van de officiële stations en alle beschikbare sensormetingen die binnen een straal van één kilometer rond elk officieel station vallen. Voor 2022 constateerden we dat de standaardafwijking van de verschillen tussen officiële stations en ongekalibreerde sensormetingen tussen de 4,3 en 6 µg/ m³ ligt, en dat 95% van de gegevens binnen ±4 µg/ m³ ligt. Dit komt overeen met wat Wesseling, J et al. (2021) vonden voor het jaar 2020. Voor de gekalibreerde sensormetingen in 2022 lag de standaardafwijking van de fout tussen 3,9 en 5 µg/ m³ ligt. Wesseling, J et al. (2021) concludeerden dat de spreiding in metingen niet substantieel toeneemt bij gebruik van de sensoren op (bewegende) fietsen.
- De representatiefout, e_r , is dynamisch en verandert in tijd en ruimte en vertegenwoordigt de onopgeloste schalen van het model in de ruimte (in een modelpixel) en de tijd (in een uur). Superwaarnemingen worden berekend op basis van de gekalibreerde metingen van de mobiele sensoren. De meetgegevens worden samengevoegd in de temporele en ruimtelijke resolutie van de modelsimulatie. Gemiddelde gegevens per uur en hun standaardafwijking binnen de pixelgroottes van het model (d.w.z. 0,01°×0,01°, wat gelijk is aan ongeveer 1x1km) worden berekend. In deze studie wordt aangenomen dat de representatiefout gelijk is aan de standaardafwijking van alle metingen die binnen een uur vallen in dezelfde pixel en die de variabiliteit binnen deze pixel voor dit specifieke uur vertegenwoordigt.

De uiteindelijke waarnemingsfout voor een pixel in een bepaald uur wordt dan geacht gelijk te zijn aan:

$$e_o = \sqrt{e_m^2 + e_r^2}$$

waarbij e_m wordt beschouwd als vast per pixel en uur en gelijk is aan 5 µg/m³ en e_r verandert bij elke pixel en uur. Voor de integratie in het LOTOS-EUROS-model wordt rekening gehouden met de gemiddelde PM2.5-metingen per uur die beschikbaar zijn binnen de modelpixels en de overeenkomstige waarnemingsfouten per uur.

Energy & Materials Transition

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
www.tno.nl