

Samenvatting modelvalidatie en modeloptimalisatierapport CurieuzeNeuzen Vlaanderen

Wouter Lefebvre, Hans Hooyberghs, Sam De Craemer, Bino Maiheu, Felix Deutsch

Inleiding

Het meest zichtbare gedeelte van het CurieuzeNeuzen Vlaanderen project was de meetcampagne die plaatsvond in mei 2018. Een minder zichtbaar gedeelte is de vergelijking van de resultaten van het ATMO-Street luchtkwaliteitsmodel voor NO₂ met de metingen, en de verdere optimalisatie van het model op basis van de CurieuzeNeuzen resultaten. Het ATMO-Street Model (vroeger het RIO-IFDM-OSPM model genoemd naar zijn belangrijkste componenten) wordt gebruikt in Vlaanderen om jaarlijks de huidige luchtkwaliteit met een groot ruimtelijk detail te bepalen. Daarnaast wordt het gebruikt om mogelijke toekomstscenario's te analyseren en om de impact van bepaalde maatregelen of ontwikkelingen op de luchtkwaliteit in te schatten. Verbeteringen aan dit model leiden dus automatisch tot een betere ondersteuning van het Vlaamse en lokale luchtkwaliteitsbeleid. Daarnaast kan de vergelijking met de CurieuzeNeuzen-dataset ook een indicatie geven over hoe groot de modelonzekerheid is bij de inschatting van de luchtkwaliteit op verschillende type locaties.

Het ATMO-Street Model

Het ATMO-Street model bestaat uit een koppeling van een reeks afzonderlijke modellen die elk hun eigen rol spelen om tot een goede berekening van de luchtkwaliteit te komen (Figuur 1). Dit is nodig omdat luchtkwaliteit bepaald wordt op verschillende schalen: van de globale schaal, over de regionale schaal, naar de stedelijke en de lokale schaal. De belangrijkste componenten van het model zijn:

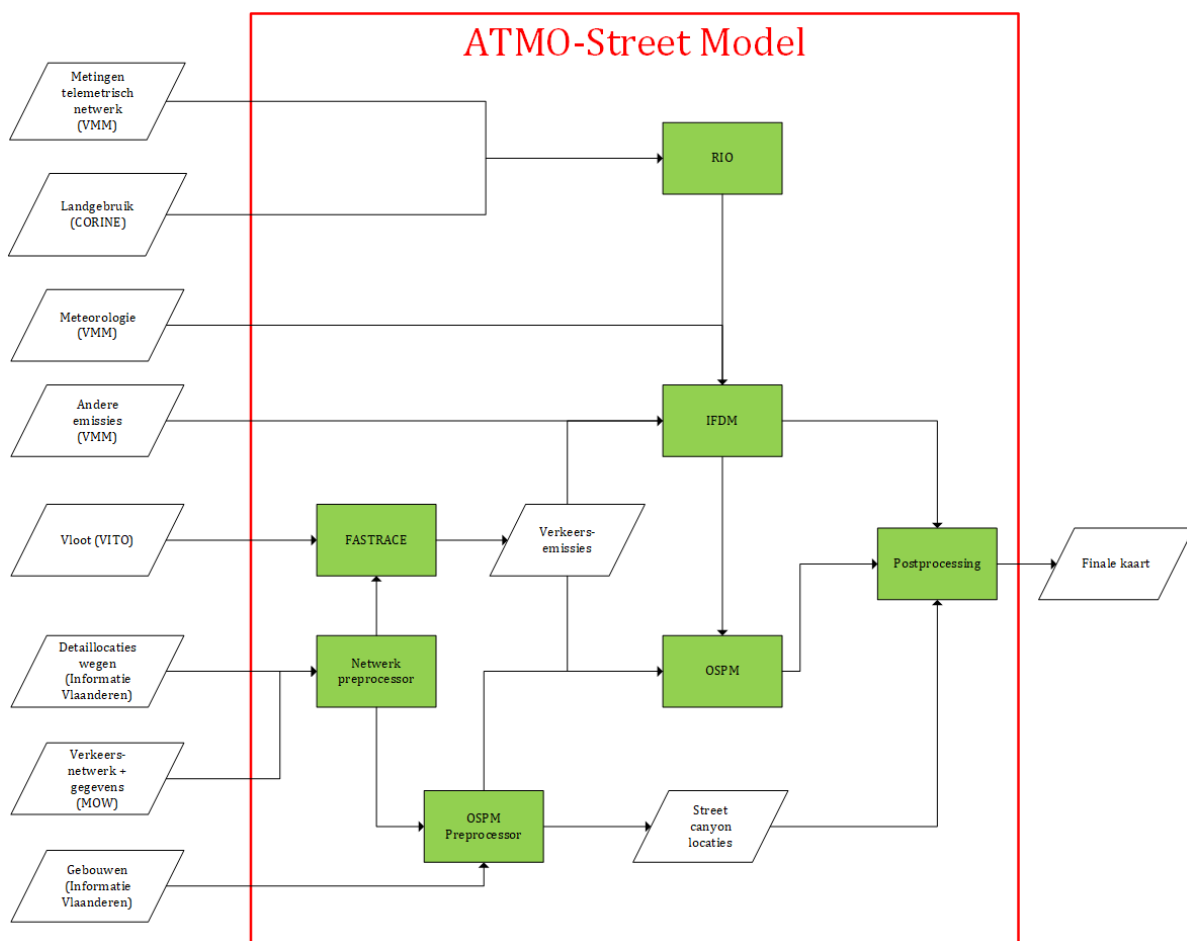
- Het FASTRACE-model (VITO): Dit zet gegevens over de samenstelling van het wagenpark en de drukte op de verschillende wegsegmenten in Vlaanderen om in wegverkeeremissies.
- Het RIO-model (VITO/VMM): Dit model bepaalt op basis van het landgebruik en de luchtkwaliteitsmetingen van het telemetrisch netwerk (de standaard metingen die uitgevoerd worden door de VMM) uur per uur de luchtkwaliteit op een lage ruimtelijke resolutie (4x4 km²).
- Het IFDM-model (VITO): Dit model berekent de verspreiding van de vervuiling rond wegen, scheepvaartroutes, en de belangrijkste industriële bronnen. Obstakels zoals gebouwen worden hierbij genegeerd. De berekening gebeurt op hoge ruimtelijke resolutie (tot ongeveer 20x20 m² waar nodig).
- Het OSPM-model (Aarhus University): Dit model bepaalt de luchtkwaliteit op locaties waar gebouwen langs de wegen de verspreiding en verdunning van de vervuiling afkomstig van het wegverkeer verminderen. Het OSPM model berekent het effect van de gebouwen op de verspreiding van de luchtvervuiling.

Om deze berekeningen uit te voeren is er natuurlijk veel informatie nodig. We lijsten de belangrijkste bronnen van informatie even op:

- Metingen telemetrisch netwerk (VMM): Dit zijn de standaard metingen van de luchtkwaliteit die VMM permanent uitvoert. Voor NO₂ zijn dit momenteel iets meer dan 50 meetplaatsen in Vlaanderen.
- Landgebruikskaart (CORINE): De kaart met het type van landgebruik (bv. stedelijk gebied, water, landbouw, natuur, ...) in Vlaanderen.

- Meteorologie (VMM): De weersgegevens (temperatuur, windsnelheid en -richting) voor Vlaanderen, zoals gemeten door de VMM.
- Andere emissies (VMM): De emissies van de niet-verkeersbronnen (zoals industrie, huishoudens, ...) in Vlaanderen.
- Vloot (VITO): De verdeling van het wagenpark in verschillende categorieën (bv. diesel/benzine, ... maar ook milieunormen e.d.).
- Locaties van de wegen (Informatie Vlaanderen): Een bestand met de exacte ligging van alle wegen in Vlaanderen.
- Verkeersnetwerk met verkeersgegevens (MOW): Een vereenvoudigd verkeersnetwerk (er is niet op alle wegen verkeersinformatie beschikbaar, en de locatie van de wegen is vereenvoudigd) met daaraan gekoppeld het aantal voertuigen die er passeren.
- Gebouweninformatie (Informatie Vlaanderen): Een bestand met de locatie en de hoogte van de gebouwen in Vlaanderen.

Voor de specifieke vergelijking met de CurieuzeNeuzen data set, werd het ATMO-Street model voor NO₂ doorgerekend voor de periode van de meetcampagne. De resultaten werden vergeleken met de set van metingen die voldoende betrouwbaar geacht werd voor de modelvalidatie (17,886 metingen). Deze set van metingen is bekomen na de kalibratie van de metingen op de telemetrische stations (toevoegen van 3.63 µg/m³ aan de gemeten waarden omdat de meetbuisjes systematisch de werkelijke concentraties onderschatten) maar zonder de omzetting naar het jaargemiddelde, aangezien het model doorgerekend werd voor de exacte meetperiode.



Figuur 1: Voorstelling van het ATMO-Street Model met zijn in- en uitvoer.

Modelonzekerheid

Wanneer we het model met de metingen vergelijken zullen er verschillen tussen beide naar boven komen. Deze afwijkingen bestaan uit een combinatie van verschillende factoren. Ten eerste is ATMO-Street “een model” van de werkelijkheid en bevat het dus niet alle complexe processen die zich in de werkelijkheid voordoen. In sommige situaties kan die werkelijkheid té complex zijn om door het model correct beschreven te worden en worden er dus vereenvoudigingen gemaakt. Ten tweede is het model, zoals hoger aangegeven, afhankelijk van heel wat invoerdata. Fouten of onvolkomenheden in deze invoer worden meegenomen en zijn bijgevolg mee verantwoordelijk voor een deel van de modelonzekerheid. Finaal spelen ook onzekerheden op de metingen een rol en kunnen die ook het resultaat van de modelvalidatie bepalen. Wanneer we dus een bepaalde afwijking van het model ten opzichte van de metingen vaststellen, is het belangrijk om deze drie verschillende bronnen van onzekerheid in het achterhoofd te houden en mee te nemen bij de analyse van de resultaten.

Categorieën van metingen

In de bespreking van de vergelijking tussen het model en de metingen zullen we soms onderscheid maken tussen drie types van meetpunten:

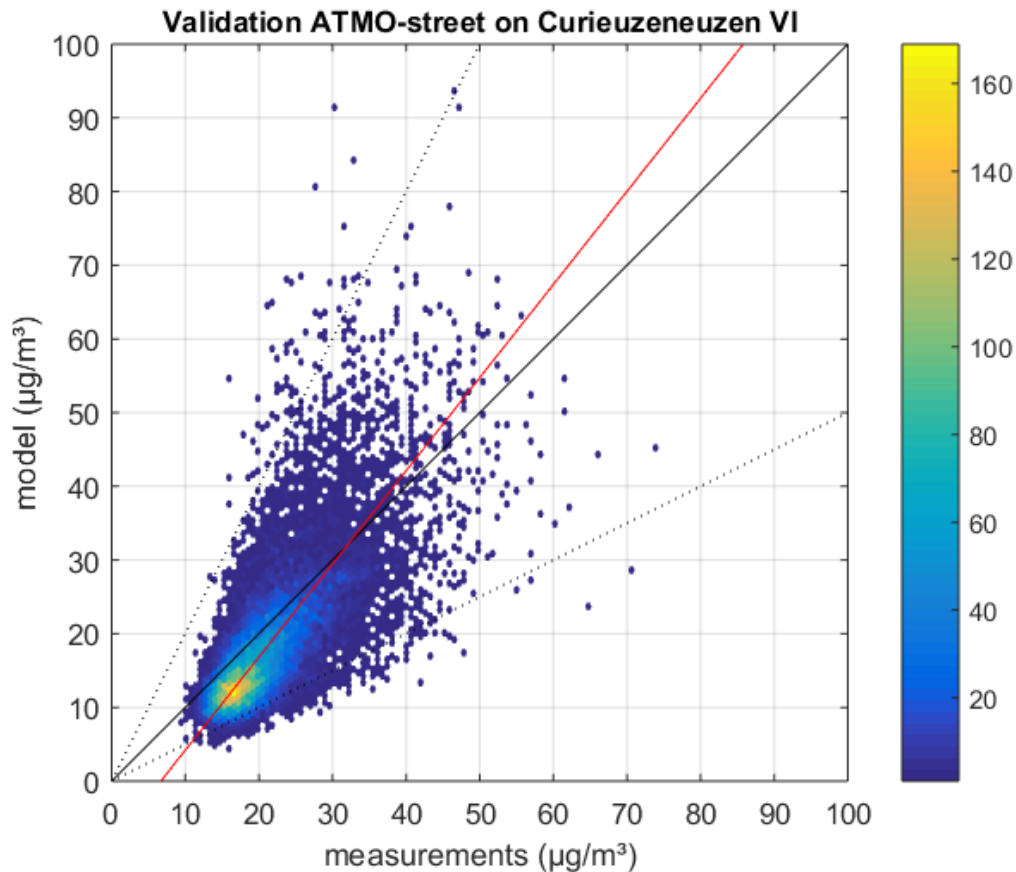
- Achtergrondlocaties waar de bijdrage van het lokale verkeer en de lokale industrie aan de concentraties klein is.
- Street canyon locaties, waar gebouwen langs de weg zorgen voor een beperkte verdunning van de lokale verkeersemissies en concentraties.
- Verkeerspunten, waar de invloed van het (lokale) verkeer op de concentraties groot is, maar waar geen belangrijke invloed ingeschat wordt van de gebouwen langs de weg.

De bepaling of een punt in Vlaanderen al dan niet een street canyon locatie is, gebeurt met een algoritme dat zich baseert op de weglocatie en de gebouweninformatie. Dit algoritme brengt echter ook enkele onzekerheden met zich mee, voornamelijk op locaties waar de gevel-tot-gevel-afstand sterk varieert binnen de straat.

Validatie van het oorspronkelijke model

We vergelijken de CN-metingen en de ATMO-Street modelwaardes op alle 17,886 geselecteerde meetpunten. Gemiddeld vinden we dan een onderschatting van $2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ door het model (BIAS), doch bij de metingen rond de jaarlimiet vinden we een overschatting van ongeveer $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. We vinden voor de MAE (het gemiddelde van het absolute verschil tussen model en meting per punt) een waarde van $5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De R^2 -waarde van de model-metingvergelijking is 0.52 (Figuur 2). De FAIRMODE MQI-waarde¹ staat op 1.01. Er zijn echter duidelijke verschillen tussen de types meetpunten vast te stellen. Terwijl het model de achtergrondlocaties en de verkeerspunten systematisch licht onderschat, krijgen we een overschatting door het model op de street canyon locaties, in het bijzonder deze met hoge concentraties. We zien ook een grotere absolute onzekerheid op de individuele punten bij hogere concentraties.

¹ In het kader van FAIRMODE (<https://fairmode.jrc.ec.europa.eu/>) is een methode bepaald om binnen Europa op een standaard manier modellen te valideren. Dit gebeurt aan de hand van de FAIRMODE Modelling Quality Indicator (of MQI). Een model voldoet aan de FAIRMODE standaard als de MQI waarde kleiner dan 1 is (hoe lager, hoe beter).



Figuur 2: Hexplot van de model-metingvergelijking. Ieder punt stelt één of meerdere meetlocaties voor (waarbij de kleur aangeeft hoeveel meetlocaties). De meting op deze locatie valt af te lezen op de X-as (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$); de modelwaarde op deze locatie is te vinden op de Y-as (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$). De zwarte volle lijn is de 1-1 lijn. De rode lijn is de Deming-regressie van de modelwaardes op de metingen. De grijze stippellijnen markeren het interval van een factor 2 op de meetwaarden.

Om dit verder te onderzoeken, werd er vervolgens gekeken naar de locaties waar de verschillen tussen het model en de metingen opvallend groot zijn. Opvallend was dat 60% van de punten met de grootste absolute modelafwijkingen te vinden waren in zeven gemeentes (Gent, Halle, Aartselaar, Beveren, Rumst, Niel en Boom). Deze gemeentes werden in detail bekeken. Een beperkt deel van de modelafwijkingen kan verklaard worden door de onzekerheid in de classificatie van de punten, waardoor voor sommige locaties de bijdrage ten gevolge van de bebouwing onterecht niet werd meegenomen. ATMO-Street rekent met name zowel de concentraties met en zonder gebouwen door. Voor de uiteindelijke modelkaart wordt beslist op basis van de gebouwendata en de verkeersdata welke van beide dan gebruikt wordt. Daar zit soms een mismatch tussen, wat in beide richtingen kan werken. Een oorzaak is dat een straatbreedte (gevel-tot-gevel) nog wel eens varieert. Voor een aantal punten zien we duidelijke verschillen tussen model en meting die direct gelinkt kunnen worden aan fouten in de invoerdata, meer bepaald, aan fouten in de verkeersintensiteiten die gebruikt worden in het model. Het gaat dan vaak om situaties die de laatste tijd veranderd zijn (bv. circulatieplan Gent) maar die nog niet opgenomen zijn in het verkeersmodel, of om fouten in de officiële verkeerscijfers als gevolg van meetfouten in de verkeerstoposten.

Modelverbeteringen

Op basis van de hierboven beschreven resultaten zijn we op zoek gegaan naar modelverbeteringen die tot een accurater model leiden. We hebben twee belangrijke aanpassingen doorgevoerd:

- Bij de analyse van de overschattingen die er gebeurden binnen de street canyons hebben we gemerkt dat de omzetting van de wind tussen masthoogte (invoer van het model) en dakhoogte (wat het model eigenlijk gebruikt) niet optimaal was. Er werden dan ook aanpassingen uitgevoerd om de windsnelheid beter te parameteriseren in de invoer van het OSPM-model. Deze verandering zal ook voor de andere polluenten dan NO₂ een rol spelen in het berekenen van de concentraties.
- Het RIO-model maakt, zoals hierboven vermeld, de achtergrondconcentraties aan op basis van het landgebruik en de telemetrische metingen van VMM. Daarom moet er eerst, op basis van dit telemetrisch netwerk, een verband gezocht worden tussen de metingen en het omliggende landgebruik. Het aantal locaties dat hiervoor beschikbaar is, is echter beperkt, met ongeveer 50 meetstations. Daardoor werd het verband voor bepaalde landgebruiksklassen slechts bepaald op basis van enkele punten en was de onzekerheid hierop relatief groot. Dit probleem werd opgelost door een analyse te maken van de relatie landgebruik/concentraties op basis van de CurieuzeNeuzen-data-meetset voor NO₂. Op deze manier kan de achtergrond-concentratie van het model dan ook beter ingeschat worden.

Daarnaast werden twee aspecten geïdentificeerd waar modelverbeteringen in eerste instantie niet of slechts beperkt mogelijk bleken.

- De verkeersdata. De verkeersdata blijkt op verschillende locaties sterk af te wijken van de werkelijkheid. Deze data zijn echter de verantwoordelijkheid van de betrokken dataleverancier (Departement MOW) waar de verkeersspecialisten ook aanwezig zijn om deze data te verbeteren. Binnen dit project zijn wij echter gebonden aan de bestaande dataset. Ook ontbreken momenteel goede gegevens over filevorming. Dat kan lokaal belangrijk zijn voor de luchtkwaliteit.
- Het algoritme dat bepaalt of een punt een street canyon is of niet. We vonden een beperkt aantal punten waarin het algoritme niet naar behoren werkt. Op die punten vinden we dan vaak heel grote afwijkingen tussen het model en de metingen. Het gaat hier echter om een heel beperkt aantal punten, en vaak wordt de concentratie in de onmiddellijke omgeving wel correct gemodelleerd. Daarnaast zorgen verbeteringen op specifieke locaties voor een verslechtering op andere locaties. Vandaar dat besloten werd om hier verder de details eerst uit te zoeken, en nog geen aanpassingen te doen momenteel.

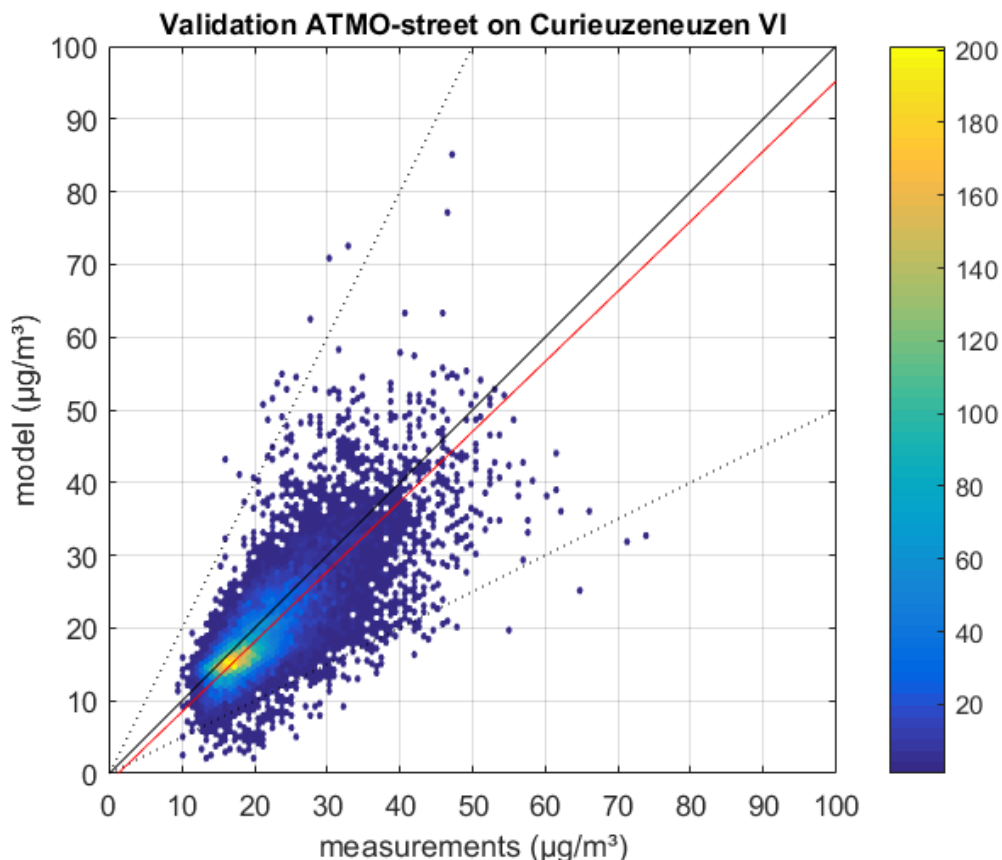
Finaal zijn we in overleg gegaan met de makers van het OSPM-model (Aarhus University). Hieruit bleek dat zij op dezelfde problemen botsen als wij en er altijd randgevallen zullen zijn die moeilijk te modelleren zullen blijven. Uit de discussie kwamen drie specifieke mogelijke situaties naar voren die verbeterd zouden kunnen worden en die vervolgens gedetailleerd onderzocht werden:

- Lintbebouwingslocaties, waarbij er aan beide zijden van de weg (half) open bebouwing te vinden is. Hierbij bleek het model zich te gedragen zoals verwacht. Het niet meenemen als street canyon van zulke locaties zou het model verslechteren, want er is wel degelijk een effect van de gebouwen op de concentraties op deze locaties.
- Brede street canyons: street canyons waarbij het gemotoriseerd verkeer zich ver van de gevels bevindt, vaak door aanwezigheid van brede voetpaden/fietspaden/parkeerstroken/busstroken. Hierin zien we aanwijzingen dat het model de concentraties op deze locaties licht overschat. Het zou het dus interessant zijn om informatie over de breedte-verdeling mee te nemen, mits ze op een algemene manier ter beschikking is. Momenteel ontbreken echter de benodigde datasets om deze effecten voor heel Vlaanderen correct in de invoer op te nemen.

- Half-open canyons: straten die maar aan één kant gesloten bebouwing hebben, en aan de andere kant volledig open zijn. De invloed van de gebouwen op de luchtkwaliteit wordt hier momenteel niet in rekening gebracht. Het aantal locaties van dit type blijkt beperkt te zijn.

Validatie van het verbeterde model

De boven vermelde modelverbeteringen hebben een duidelijk effect op de resultaten van de modelvalidatie. De gemiddelde afwijking wordt lager (van $-2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ naar $-1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$), de MAE op de individuele metingen daalt (van $5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ naar $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en de R^2 stijgt (van 0.52 naar 0.58) (Figuur 3). Van een overschatting in de omgeving van de jaarlimiet is nu geen sprake meer, de onderschatting is nu heel constant doorheen de range van meet-modelwaardes ($-2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ rond de limietwaarde). De FAIRMODE MQI-waarde daalt van 1.01 naar 0.77, hetgeen zeer goed nieuws is. We zien nog altijd een grotere absolute onzekerheid op de individuele punten bij hogere concentraties maar de overschattingen bij de hoge street-canyon-waardes zijn verdwenen. Voor elk van de types meetlocaties zien we nu een redelijk gelijkaardige lichte onderschatting door het model.



Figuur 3: Hexplot van de model-metingvergelijking (modelversie eind 2018). Ieder punt stelt één of meerdere meetlocaties voor (waarbij de kleur aangeeft hoeveel meetlocaties). De meting op deze locatie valt af te lezen op de X-as (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$); de modelwaarde op deze locatie is te vinden op de Y-as (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$). De zwarte volle lijn is de 1-1 lijn. De rode lijn is de Deming-regressie van de modelwaardes op de metingen. De grijze stippellijnen markeren het interval van een factor 2 op de meetwaarden.

Er werd een uitgebreide statistische analyse uitgevoerd om te zien of de afwijking tussen model en meting verklaard kan worden door een reeks parameters (zoals bv. afstand tot een snelweg, hoogte van de meting, aanwezigheid van bomen in de straat, ...) waarvan we mogelijks een effect verwachten.

De verklarende sterkte van de statistische analyse bleef echter laag. Desondanks vonden we enkele (beperkte) effecten:

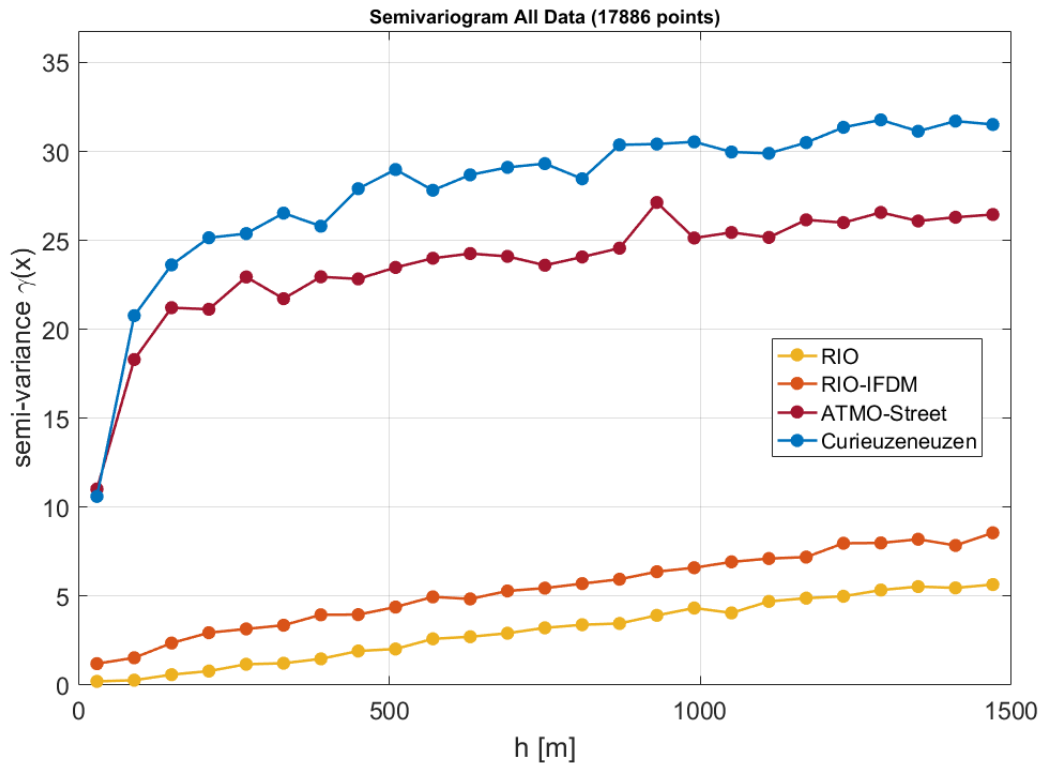
- Een overschatting in verstedelijkte gebieden.
- Een kleine onderschatting op plaatsen dichtbij, maar niet tegen een snelweg.
- Een overschatting in street canyons met veel verkeer, of een onderschatting in deze met weinig verkeer, of beiden. Dit kan liggen aan de reeds aangehaalde problemen met verkeersinvoerdata, maar ook aan gerelateerde parameters die we niet konden testen (bvb. congestie).

Daarnaast zijn er enkele specifieke situaties nog in detail bekeken. Het gaat hier bijvoorbeeld om enkele gewestwegen waar bewust extra meetbuisjes toegekend werden om ze in detail te kunnen bekijken. Hieruit blijkt opnieuw het belang van het algoritme dat inschat of een punt een street canyon is, en van de verkeersgegevens.

Ruimtelijke variabiliteit van de NO₂-concentraties

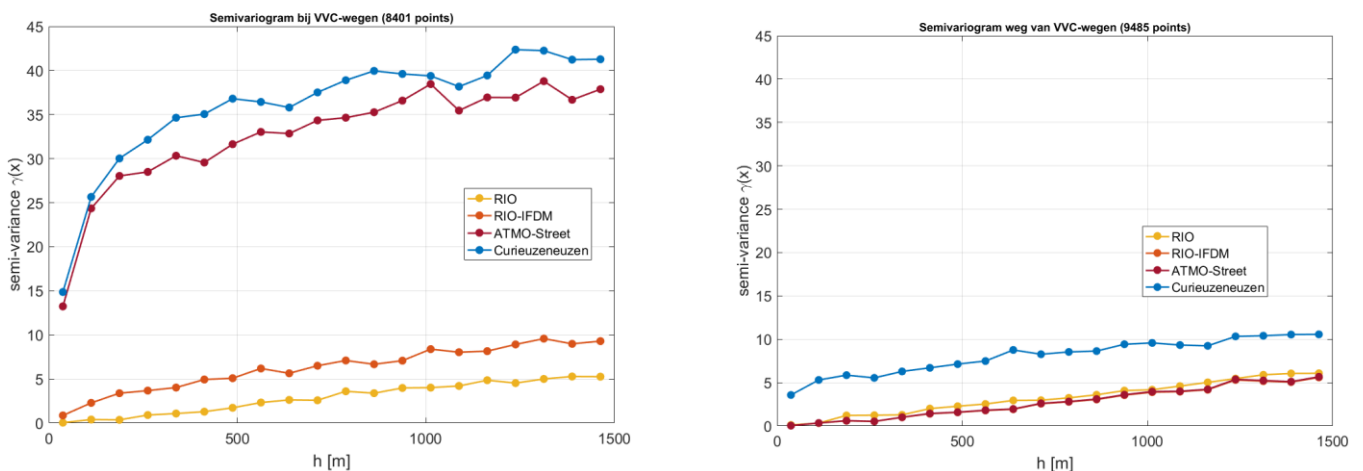
Een basisvraag waarop CurieuzeNeuzen Vlaanderen een antwoord wou bieden was of de huidige luchtkwaliteitsmodellen in staat zijn om de verschillen op korte afstand in NO₂-concentraties voldoende in kaart te brengen. Het is met name gekend, en dit bleek ook duidelijk uit de metingen, dat de NO₂-concentraties sterk kunnen verschillen van straat tot straat en het is dan ook noodzakelijk dat modellen deze verschillen kunnen capteren.

Om dit te onderzoeken werd gebruik gemaakt van de methode van het semivariogram. Deze toont een maat van het gemiddelde verschil tussen twee punten in functie van de afstand tussen die twee punten. Typisch is er een kleiner verschil tussen twee heel dicht bij elkaar gelegen punten dan tussen twee verderaf gelegen punten. Dit effect vertaalt zich op een semivariogram als een stijgende lijn in functie van de afstand. Vanaf een bepaald moment begint de curve af te vlakken (hier vanaf zowat 200 m afstand) en leidt een stijgende afstand nog slechts beperkt tot een stijgend verschil in metingen. We bekijken hier enkel de spatiale variatie op korte afstand tussen de meetpunten (tot 2 km afstand). Op Figuur 4 zien we het semivariogram voor de metingen en de verschillende modelonderdelen samen. Het is duidelijk dat het RIO-model alleen de variabiliteit tussen de meetpunten schromelijk onderschat. Dit is logisch gezien de lage resolutie (4x4 km²) van dit model. De koppeling met IFDM doet de spatiale variatie in het model duidelijk stijgen. De berekening van de street canyons op basis van OSPM is echter de stap die het meest verklaart van de spatiale variatie op korte afstand. Het overgrote deel van de gemeten variatie wordt dan ook verklaard in het ATMO-Street model (RIO-IFDM-OSPM).



Figuur 4: Semivariogram voor alle datapunten.

De ontbrekende spatiale variatie in het model kan vooral terug gebracht worden naar punten die gelegen zijn langs wegen waarvan er geen verkeersintensiteit beschikbaar is (Figuur 5). Dit is logisch aangezien een mogelijks belangrijke (lokale) bron van vervuiling dan ontbreekt voor deze meetpunten. Dit is echter niet voor elk van deze meetpunten een probleem: metingen langs verkeersluwe straten met open bebouwing zullen weinig effect ondervinden van deze lokale weg. Het blijkt echter wel uit deze analyse dat een aantal ontbrekende wegen voldoende intensiteit hebben (waarschijnlijk gekoppeld aan de aanwezigheid van gebouwen die de verspreiding van de vervuiling tegengaan) om de lokale concentraties significant te beïnvloeden. Een belangrijke modelverbetering zou er dan ook in bestaan om deze wegen correct mee te nemen.



Figuur 5: Semivariogram voor de datapunten langs wegen met verkeersinformatie (links) en wegen zonder (rechts).

Conclusies

Op basis van de voorgaande hoofdstukken kunnen we volgende conclusies trekken:

- Het ATMO-Street Model zoals het gebruikt werd tot vóór Curieuzeneuzen Vlaanderen beschreef reeds relatief goed de gemeten NO₂-concentraties in Vlaanderen.
- Op basis van de meetresultaten van Curieuzeneuzen Vlaanderen en de vergelijking tussen het model en deze metingen kon onderzocht worden of aanpassingen in het model effectief betere resultaten gaven. Deze aanpassingen hebben geleid tot duidelijk betere modelresultaten (FAIRMODE MQI waarde daalt van 1.01 naar 0.77; gemiddelde modelfout daalt van 5.1 naar 3.5 µg/m³). Waar het model rond de jaarlimiet eerst overschatte is er nu een soortgelijke onderschatting te vinden voor deze hoge concentraties.
- De gemeten spatiale variatie op korte schaal wordt goed verklaard door het model.
- Ondanks een aantal verbeteringen onderschat het model nog steeds gemiddeld de concentraties licht.
- Statistische modellen met gekende en kwantificeerbare invloeden op de stikstofdioxide concentratie als parameters kunnen overblijvende afwijkingen maar beperkt verklaren. Er komen geen concrete pistes naar boven die niet reeds in deze conclusies vermeld worden.
- Een belangrijk overblijvend probleem met de invoerdata voor het model is de kwaliteit van de verkeersdata. Er zijn verschillende locaties geïdentificeerd waar er afwijkende verkeerscijfers gevonden zijn. Dit kan deels te maken hebben met de beslissingen van de laatste jaren in verschillende steden om het verkeer uit de kernen te weren. Deze beslissingen zijn niet altijd opgenomen in het verkeersmodel.
- Een ander belangrijk werkpunt is verder kijken hoe het model omgaat met half-open street canyons.
- Ook moet er gekeken worden naar de modelperformantie tegen de grenzen van het gewest aan, om te zien of daar nog verbeteringen kunnen gebeuren.
- Algemeen kan echter gesteld worden dat het ATMO-Street model in staat is om de NO₂-concentraties in Vlaanderen op een voldoende accurate manier te beschrijven (haalt de Fairmode MQI).