

METEN VAN NO2 MET GOEDKOPE SENSOREN

Joost Wesseling, Derko Drukker, Peter Zandveld, Lou Gast
Versie 18 september 2017, © RIVM

METEN VAN NO2 MET GOEDKOPE SENSOREN	1
Inleiding	1
Waarom NO2 met goedkope sensoren meten?	2
Keuze van de sensor	4
Verwerking en presentatie van de resultaten	5
IJking van metingen en onzekerheid	5
Gebruik van de sensoren in de praktijk	6
Bijlage1, Opbouw meetkit en elektronica	9
Bijlage 2, IJking en gevoeligheid	11
IJking in de praktijk.....	11
Gevoeligheid van de ijking.....	13

Inleiding

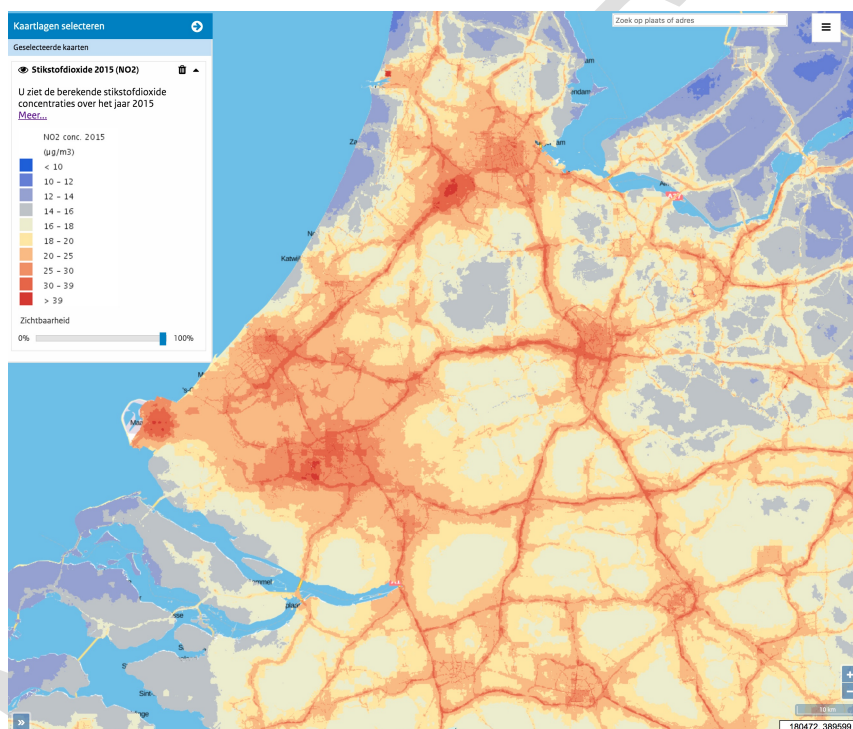
Dit document beschrijft hoe met goedkope sensoren geëxperimenteerd wordt om een indruk te krijgen van de luchtkwaliteit. Er is nog duidelijk sprake van experimenteren omdat de resultaten van goedkope sensoren in absolute zin (nog) niet zomaar met die van officiële metingen kunnen worden vergeleken of daar een vervanging voor zijn. Aan de andere kant zijn de resultaten van de goedkope sensoren zodanig dat ze zeer de moeite waard zijn om mee te experimenteren, zowel voor het RIVM als voor burgers en overheden. Deze experimenten zijn onderdeel van een breder innovatieprogramma van het RIVM waarin de rol van nieuwe technologie in Nationale monitoringstaken wordt onderzocht.

Er is geen reden om aan de in Nederland gerapporteerde niveaus van stikstofdioxide te twijfelen, daarvoor zal inzet van goedkope sensoren niet veel uitmaken. Een belangrijk voordeel van sensoren, als ze praktisch ingezet kunnen worden, zit in hun aanschafprijs, die heel veel lager is dan die van officiële meetapparatuur. Door die lage prijs kunnen relatief grote aantallen worden ingezet om de concentraties in een stad of gebied in veel meer detail in ruimte en tijd door te meten dan nu haalbaar is. In tegenstelling tot bijvoorbeeld metingen met Palmesbuisje, tonen sensoren namelijk ook een gedetailleerd verloop van de concentraties in de tijd. Inzet van goedkope sensoren voor luchtkwaliteit kent momenteel nog veel onzekerheden. Die beperkingen en onzekerheden zijn geen reden om er dan maar niets mee te doen, het is vooral een uitdaging om te onderzoeken wat er nu en de komende jaren allemaal al mee kan.

Waarom NO₂ met goedkope sensoren meten?

Om allerlei redenen zijn er veel (groepen) burgers en ook overheden die zelf inzicht willen verkrijgen in de luchtkwaliteit in hun directe omgeving. Een deel van die redenen is domweg omdat men zich zorgen maakt over de luchtkwaliteit, de concentraties wil weten in hun tuin, bij hun gevel en de speelplaats van de school in de buurt. Het gaat meestal niet zozeer om toetsen aan normen maar meer om inzicht te krijgen in de concentratieniveaus en wellicht ook in de belangrijkste lokale bronnen. Met dit soort informatie kunnen burgers het gesprek met overheden aangaan.

Een van de stoffen van interesse is stikstofdioxide (NO₂) aangezien die stof een duidelijk effect op de gezondheid heeft. Het effect van NO₂ is kleiner dan dat van fijnstof, maar NO₂ is aanzienlijk makkelijker te meten dan fijnstof. Blootstelling aan de huidige niveaus van NO₂ leidt naar schatting tot een gemiddelde levensduurverkorting van circa 4 maanden, tegen circa 9 maanden voor fijnstof. Verkeer is een grote bron van NO₂, met een sterk verloop van de concentraties langs grotere wegen. Op onderstaande kaart, met de berekende jaargemiddelde NO₂ concentraties in de randstad in 2015, is de grote invloed van wegen en stedelijk gebied duidelijk te zien.



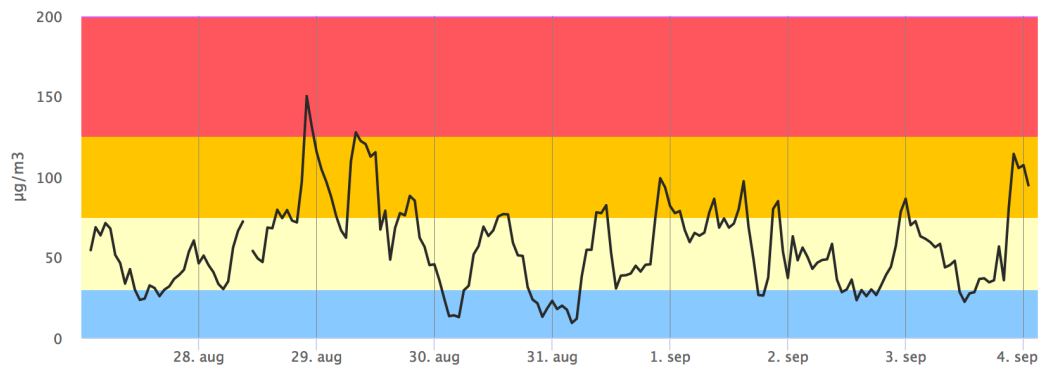
*Figuur 1, Jaargemiddelde NO₂ concentratie in ug/m³ berekend voor 2015.
De kaart is in te zien via [www. Atlasleefomgeving.nl](http://www.Atlasleefomgeving.nl).*

De bijdragen van de wegen aan de NO₂ concentraties kunnen van uur tot uur en van plek tot plek nog veel meer verschillen, tot tientallen microgrammen per kubieke meter. Hiermee zijn de bijdragen van lokale bronnen voor NO₂ veel groter dan die van andere stoffen, zoals bijvoorbeeld fijnstof. De variaties worden geïllustreerd in onderstaande metingen op locaties van de DCMR in Rotterdam, een drukke straatlocatie (Statenweg) en een achtergrondlocatie zonder veel verkeer (Zwartewaalstraat). Tevens worden de concentraties op een nabijgelegen ruraal achtergrondstation van het RIVM getoond (Groeneweg).

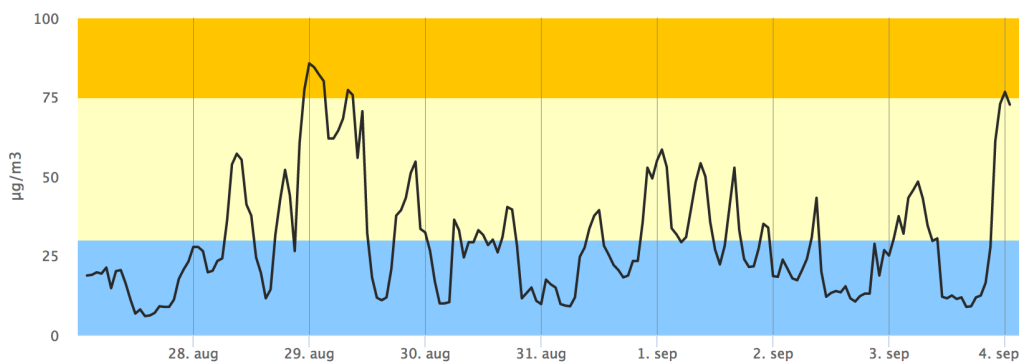
De figuren laten zien hoe sterk de concentraties in een korte periode kunnen variëren en ook wat voor verschillen er kunnen optreden tussen een straatlocatie en een achtergrondlocatie. De variaties zijn deels het gevolg van lokale bronnen en deels het gevolg van grootschaliger processen. Overigens

zijn er ook momenten, bijvoorbeeld op de grens van 30 en 31 augustus, waar de concentraties op beide locaties erg laag zijn.

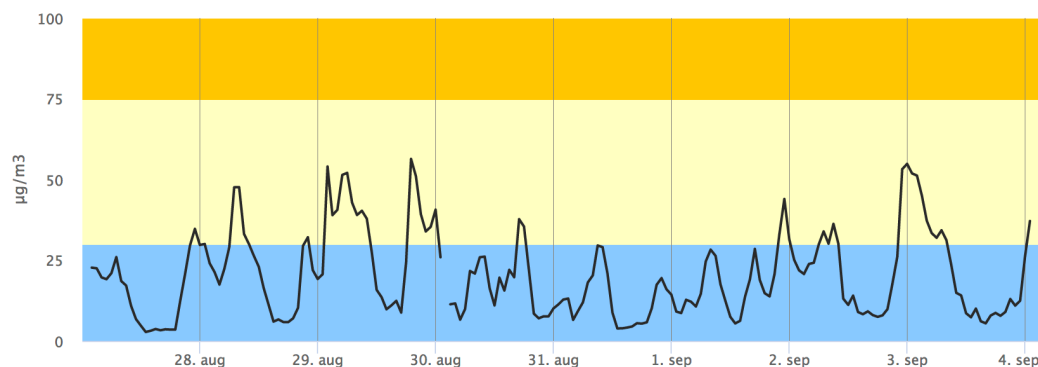
Rotterdam-Statenvweg



Rotterdam-Zwartewaalstraat



Westmaas-Groeneweg



Figuur 2, Door de DCMR en het RIVM met de officiële methode gemeten NO₂ concentraties (in µg/m³) op een straatlocatie (Statenvweg), op een stedelijke achtergrondlocatie (Zwartewaalstraat) en op een landelijke achtergrondlocatie (Groeneweg).

Het zou natuurlijk mooi zijn als bovenstaande metingen door iedereen gedaan kunnen worden. Hoge kosten en benodigde technische expertise maken dat echter onmogelijk. Met zogenaamde “Palmebuisjes” kunnen momenteel NO₂ concentraties met een onzekerheid van 15-25% worden gemeten, afhankelijk van de gebruikte ijking en typen locaties. Een dergelijke onzekerheid is niet veel groter dan die van de officieel voorgeschreven meetmethoden. De concentraties zijn de gemiddelde waarde over 4 weken, uurlijkse/dagelijkse variaties kunnen met Palmebuisjes niet worden gemeten. De kosten van Palmebuisjes bedragen ergens in de orde van 100-200 euro per locatie per jaar, afhankelijk van de meetstrategie. Ter vergelijking: een officiële meting kost in de orde van twintigduizend euro voor de apparatuur plus duizenden euro's per jaar voor onderhoud.

De laatste jaren zijn er enkele relatief betaalbare sensoren voor NO₂ op de markt gekomen die ook bij de huidige concentratieniveaus in de buitenlucht variaties in de concentratie kunnen meten. De kwaliteit van deze sensoren komt uiteraard absoluut niet in de buurt van officiële apparatuur. Dat wil echter niet zeggen dat het dus ook niet zinvol is om met de huidige goedkope sensoren te gaan experimenteren. Juist door dat experimenteren kan duidelijk worden wat wel en niet zinvol is met dergelijke sensoren en hoe de sensoren het beste door burgers en andere niet-professionals kunnen worden ingezet. Naar verwachting worden de sensoren, bij voldoende vraag uit de markt, de komende jaren beter en wellicht ook nog goedkoper. Veel burgers, overheden en ook verschillende meetinstanties willen niet wachten tot dat moment gaat komen, maar gaan nu al aan de slag met de nieuwe mogelijkheden.

Keuze van de sensor

Er zijn momenteel verschillende goedkope sensoren (minder dan 200 euro per stuk) op de markt waarmee stikstofdioxide (NO₂) kan worden gemeten. Een internationaal veel geteste en gebruikte sensor is de NO₂-B43F van de Engelse firma Alphasense. Volgens de specificaties is de NO₂-B43F in staat om in de buitenlucht concentratie-verschillen in de orde van 10-20 µg/m³ goed te meten. Hierbij moet wel gebruik worden gemaakt van door Alphasense geleverde ruis-arme elektronica. De fabrikant geeft een levensduur van de sensor op van circa twee jaar.

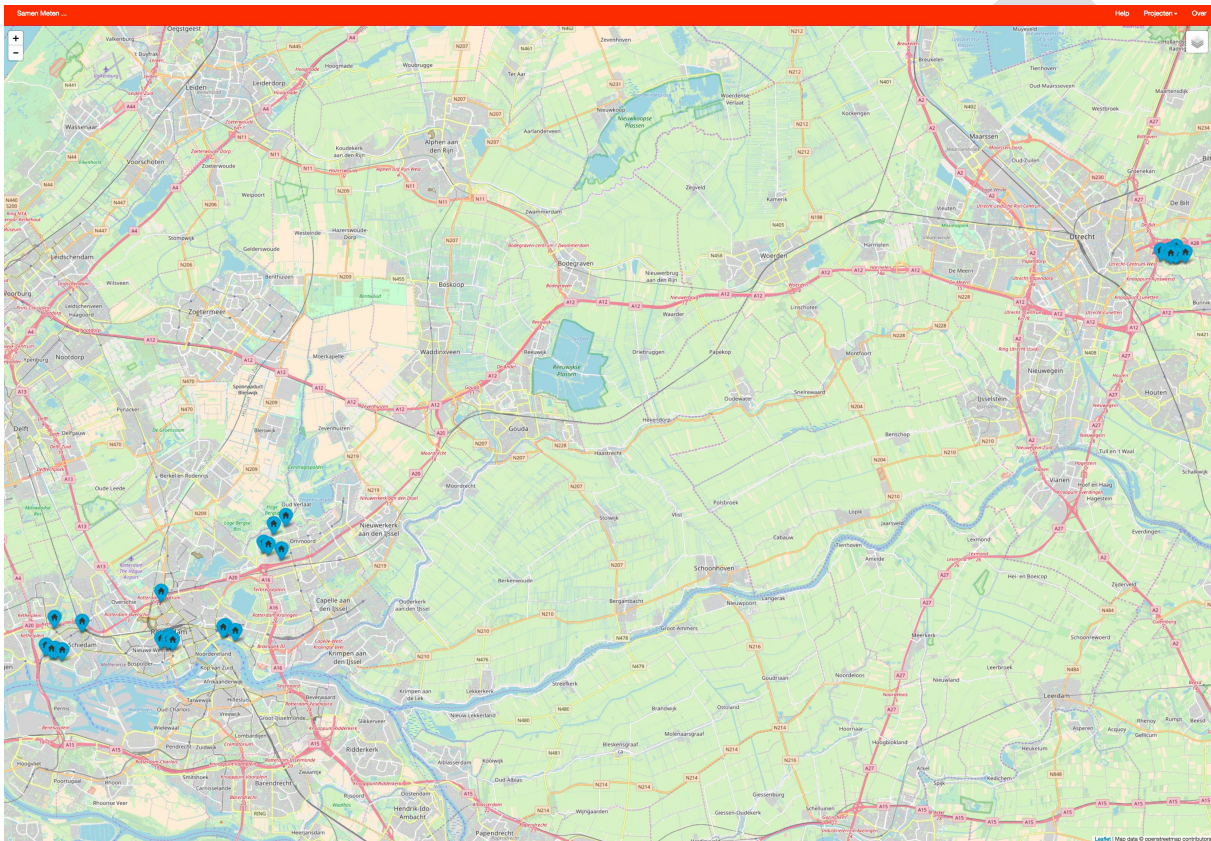
Door de combinatie van de relatief grote gevoeligheid van de sensor, de makkelijke combineerbaarheid met goedkope elektronica (zoals Arduino, Raspberry Pi) en de prijs, medio 2017: circa 150 euro voor de sensor + elektronica, heeft het RIVM deze sensor gekozen om te testen in toepassingen die gericht zijn op Citizen Science. Met deze sensor en nog circa 75 euro extra voor elektronica voor aansturing en uitlezing van de meting kan een technisch aangelegde persoon of groep een NO₂ meter bouwen. Voor de huidige meetkits van het RIVM is gekozen voor een 3D geprinte paddestoel-achtige vorm, zie figuur 3. Meer technische informatie over de sensor, de behuizing en elektronica wordt in Bijlage 1 gepresenteerd.



Figuur 3, Afbeelding van de Alphasense B43F sensor en van de paddestoelvormige behuizing, de meetkit van het RIVM.

Verwerking en presentatie van de resultaten

De resultaten van de sensor worden door de elektronica in de behuizing omgezet in een vorm die via het internet naar een server wordt gestuurd voor verwerking en presentatie. Op een server van het RIVM komen per sensor elke vijf minuten pakketjes met data binnen, voltages, temperatuur, vochtigheid, luchtdruk. Met de ijkgegevens van de specifieke sensor worden de binnenkomende gegevens omgezet in concentraties stikstofdioxide, NO₂. Alle resultaten worden direct op het dataportaal van het RIVM getoond, zie <http://meetnetdata.rivm.nl/dataportaal/>. In de volgende figuur wordt het startscherm van de interface van het dataportaal getoond.



*Figuur 4, Locaties van meetkits in Rotterdam, Schiedam en het Utrecht Science Park.
Status 3 september 2017.*

Ijking van metingen en onzekerheid

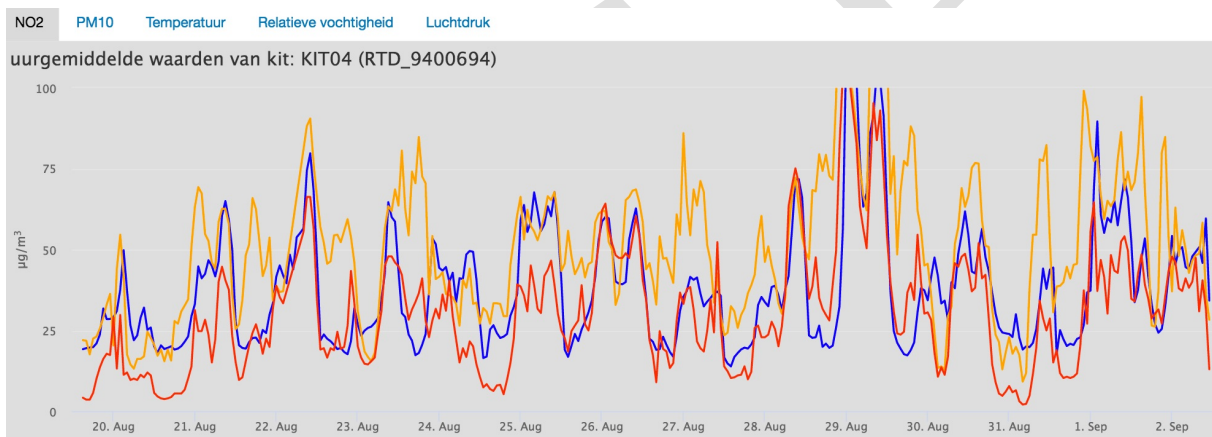
Net als professionele apparatuur moet een goedkope sensor regelmatig worden geïjkt om te zorgen dat de meting bruikbaar is. Professionele apparatuur kost enkele tienduizenden euro's, wordt dagelijks aan testgassen geïjkt en levert dan uiteindelijk een meetonzekerheid van circa 10%. In Figuur 2 moet dus eigenlijk een bandje van onzekerheid om de lijnen met concentraties worden gedacht. Twee naast elkaar geplaatste professionele meetapparaten, die door de EU voorgeschreven officiële referentiemetingen doen, kunnen (en mogen) dus 10-15% verschillen. Rond de officiële grenswaarde voor NO₂ komt 10% onzekerheid overeen met 4 µg/m³. De grote kracht van officiële referentieapparatuur is dat ze, wanneer goed bediend en geïjkt, absolute concentraties kunnen leveren met die 10% onzekerheid. Er is geen sprake van drift of verloop in de gerapporteerde concentraties. Officiële metingen kunnen fungeren als praktisch absolute ijkpunten voor minder geavanceerde apparatuur.

Dit doet al vermoeden dat simpele en goedkope meetapparaten van in totaal 250 euro per stuk aanzienlijk grotere onzekerheden zullen laten zien, zeker omdat de mogelijkheden van goedkope ijking uiterst beperkt zijn. Verschillen van soms 20% of meer tussen twee pal naast elkaar metende goedkopere sensoren zijn dan ook niet te vermijden. Sensoren zullen, voor zover nu kan worden ingeschat, de komende jaren nog uitgebreid aan officiële metingen moeten worden geijkt, eventueel via een tussenstap aan Palmesbuisjes.

In bijlage 2 wordt meer uitgebreid stilgestaan bij de ijking van de sensoren en de gevoeligheden.

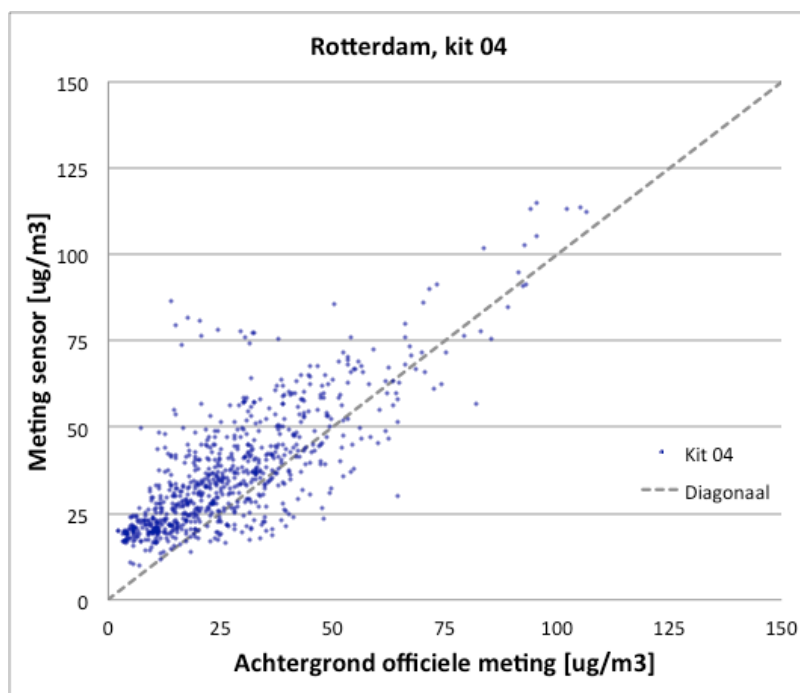
Gebruik van de sensoren in de praktijk

Na de ijking worden de sensoren in een behuizing gemonteerd en ergens op een locatie in het veld ingezet om praktische metingen te doen. Ondanks de beperkingen in de ijking kunnen er conclusies aan de meetresultaten worden verbonden. Ook als de ijking in enige mate verloopt zal dat niet opeens tot heel andere concentraties leiden. Een vergelijking tussen de resultaten van een sensor gedurende de afgelopen weken en die van officiële metingen kan dus wel degelijk nuttig zijn. In onderstaande Figuur 5 worden de NO₂ metingen van meetkit 04 (nabij de Heemraadsingel, blauwe lijn) in Rotterdam vergeleken met die van twee officiële stations, Alphons Arienstraat (achtergrond, rode lijn) en Statenweg (verkeersbelast, oranje lijn). Alle meetresultaten zijn in te zien op het data portaal van het RIVM <http://meetnetdata.rivm.nl/dataportaal/>.



Figuur 5, Schermweergave van de resultaten van meetkit 04 (nabij de Heemraadsingel, blauwe lijn) in Rotterdam vergeleken met die van twee officiële stations, Alphons Arienstraat (achtergrond, rode lijn) en Statenweg (verkeersbelast, oranje lijn). De data wordt elk uur geactualiseerd.

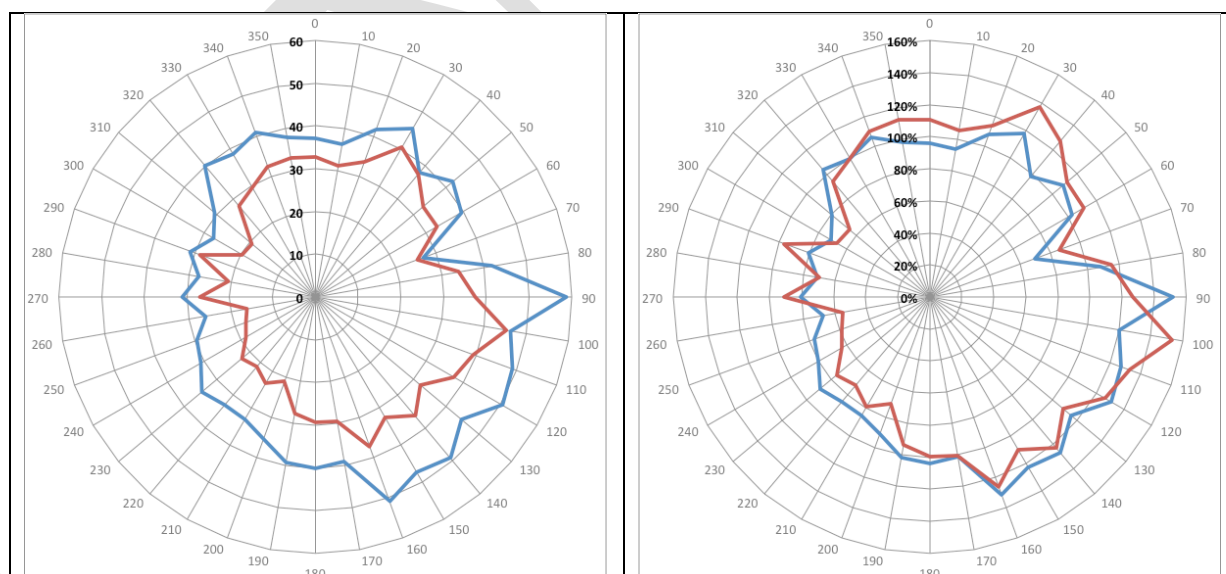
Er is een sterke overeenkomst tussen de drie lijnen, waarbij de concentraties op de direct door verkeer belaste locatie praktisch altijd hoger zijn dan op de andere locaties. In veel gevallen liggen de concentraties van de sensor tussen die van de achtergrond en direct door verkeer belaste locaties in. Tegen elkaar uitgezet is ook goed te zien dat de concentraties die de sensor meet iets hoger zijn dan de officiële concentratie op de achtergrondlocatie, zie onderstaande figuur.



Figuur 6, Gemiddelde concentraties gemeten op de achtergrondlocatie (horizontale as) en door de sensor op een andere locatie in Rotterdam gemeten waarden (verticale as).

Bij de laagste concentraties loopt de sensor tegen de grens van het zinvolle meetbereik aan, op een gegeven moment is de ruis te groot. Tevens kan niet worden uitgesloten dat de verschillen in concentraties bij de lage waarden deels het gevolg zijn van onvolkomenheden in de ijking. De ijking is vooral bij lage NO₂ concentraties gevoelig voor de invloed van de ozon concentraties. Bij de hogere concentraties is er echter nog maar beperkt gevoeligheid voor ozon in de ijking.

In Figuur 7 worden de concentraties van de achtergrondlocatie en de sensor weergegeven als functie van de windrichting, de windroos.



Figuur 7, Gemiddelde concentraties gemeten op de achtergrondlocatie (rode lijn) en door de sensor (blauwe lijn). Links worden de absolute gemeten concentraties in ug/m3 getoond en rechts de relatieve waarde, genormeerd op 100%.

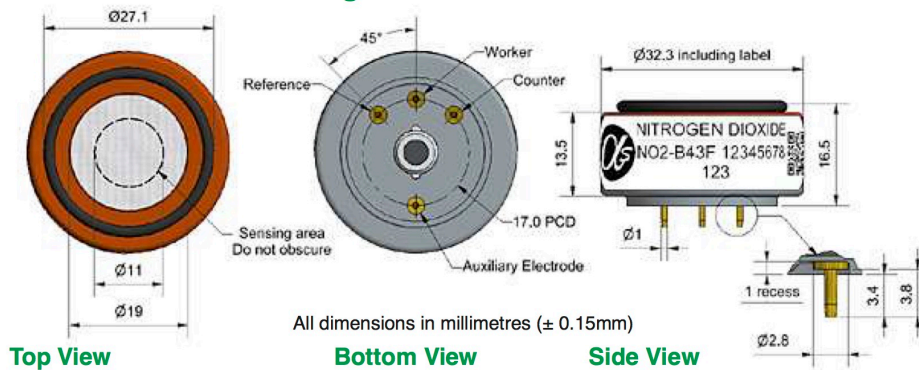
Het rechter diagram laat zien dat de meting op de achtergrondlocatie vanuit noordelijke en noordwestelijke richtingen *relatief* iets hoger belast wordt dan de sensor. De onzekerheden zijn, zoals gezegd groot, maar gegeven de locaties van de metingen zou het verschil in windroos realistisch kunnen zijn.

Bovenstaande voorbeelden laten zien dat sensoren voor NO₂ nuttige en zinvolle informatie kunnen leveren, ondanks alle bestaande beperkingen en problemen met de ijking. In 2017 en 2018 zal het RIVM, samen met anderen, in verschillende projecten verder onderzoeken op welke wijze de huidige en binnenkort ook nieuw beschikbaar komende NO₂ sensortechnologie nuttig ingezet kan worden.

Bijlage1, Opbouw meetkit en elektronica

De meetkits van het RIVM maken voor de meting van NO₂ gebruik van de B43F sensor van de firma Alphasense. De belangrijkste afmetingen en aansluitingen van de sensor worden in onderstaande figuur aangegeven.

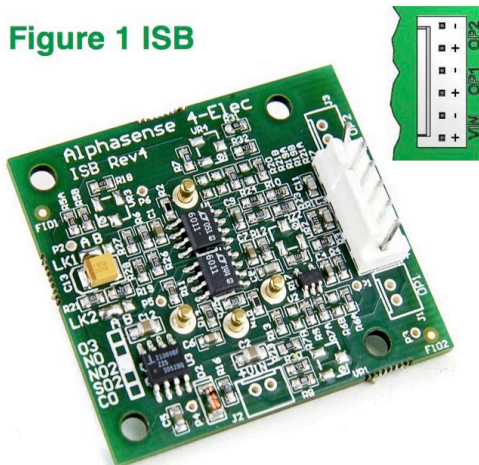
Figure 1 NO₂-B43F Schematic Diagram



Figuur B1, Informatie over de NO₂-B43F van Alphasense, bron: <http://www.alphasense.com/index.php/air/>.

Voor gebruik van de Alphasense B43F-NO₂ worden de spanningen op de uitgangen OP1 en OP2 van de bij de sensor behorende elektronica gebruikt. Omdat de variaties in spanning (slechts enkele millivolts) te klein zijn om door de ADC van een Arduino zinvol gedetecteerd te worden, is een 16-bit

Figure 1 ISB



Figuur B2, Elektronica van Alphasense.

ADC tussengeschakeld. In de meetkits van het RIVM wordt momenteel de ADS1115 van Adafruit gebruikt, het type en fabrikant maakt echter niet veel uit, zolang de ADC maar gevoelig genoeg is. De output van de ADC wordt op een Arduino aangesloten. In de praktijk worden de spanningen OP1 en OP2 niet individueel gebruikt, maar alleen het verschil. Om de temperatuur en vochtigheid te meten zijn veel mogelijkheden beschikbaar, in de huidige meetkits zit de Adafruit BME280. Ook hiervoor geldt dat elke sensor die de gewenste informatie levert gebruikt kan worden. Gebruik van een Arduino is niet noodzakelijk, een Raspberri Pi kan ook worden gebruikt. Voeding wordt verzorgd door een combinatie van een 9V voeding die via een lange tweepolige zwakstroomkabel een 580-OKI78SR5/1.5W36C omvormer voedt die in de paddestoel zit en er 5V van maakt. Deze combinatie maakt het mogelijk om de paddestoel op 5-10 meter van een stopcontact te plaatsen.

De ADC en temperatuursensor communiceren via de zogenaamde I2C bus met de Arduino, die de data verzamelt, middelt en er pakketjes van maakt voor verzending naar een server. De feitelijke communicatie gaat op praktisch dezelfde manier als tijdens het vuurwerkexperiment van het RIVM is gebruikt, via een ESP8266 WiFi chip, zie de website van het Samen Meten aan Luchtkwaliteit portaal: <https://www.samenmetenaanluchtkwaliteit.nl/vuurwerk-2016-2017> .

Voor de huidige meetkits van het RIVM is gekozen voor een 3D-geprinte paddestoel-achtige vorm, zie figuur B3.



Figuur B3, Buiten- en binnenwerk van de paddestoel meetkit van het RIVM.



Figuur B4, Paddestoel aan regenpijp.

De rand van de kap op de paddestoel is rondom voorzien van ventilatieopeningen en de elektronica is in de voet van de paddestoel verwerkt. De openingen zorgen in de praktijk voor voldoende verse lucht in de kap, eventueel kan een micro-ventilator worden gemonteerd.

Warmteopbouw kan een probleem zijn aangezien de Alphasense sensor een werkbereik van -30 tot 40 °C heeft. Als de paddestoel in de zon wordt opgehangen kan de maximum temperatuur worden overschreden. Het wordt daarom zeer sterk aangeraden om de paddestoelen alleen in de schaduw op te hangen. Met behulp van een U-vormige beugel kan de paddestoel makkelijk met tie-wraps, een klemband of schroeven aan een muur, paal of regenpijp worden bevestigd. Een strategisch geplaatste dop in de voet zorgt voor toegang tot de interne status-led's en elektronica.

Meer informatie over het zelf meten van luchtkwaliteit en wat daarvoor nodig is kan worden gevonden op de website www.samenmetenaanluchtkwaliteit.nl.

Bijlage 2, Ijking en gevoeligheid

Sensoren die direct van de leverancier komen kunnen onderling grote verschillen vertonen. Een ijking voordat de sensoren worden ingezet is dus absoluut noodzakelijk. De simpelste ijking van de door de sensor gerapporteerde concentraties bestaat uit het gedurende enige tijd vergelijken van de resultaten van de goedkope sensor met die van officiële metingen, bijvoorbeeld door de sensor op praktisch dezelfde locatie te hangen. Na minstens drie tot vier weken parallel meten kan een relatie worden gezocht tussen de resultaten van de goedkope en officiële meting. Hierbij spelen de temperatuur, vochtigheid en concentraties van andere gassen mogelijk een rol. Door de goedkope sensor met de gevonden ijking vervolgens op een andere locatie te gebruiken kunnen daar zinvolle metingen worden gedaan. Omdat de sensoren allemaal in enige mate verlopen kan er niet al te lang van een enkele ijking gebruik worden gemaakt. In korter lopende experimenten worden de sensoren dan ook vaak na een of twee maanden weer met de officiële apparatuur vergeleken. Omdat de ijking mede wordt bepaald door de temperatuur van de sensor en mogelijk ook de concentraties van andere gassen dan NO₂ moeten die gegevens beschikbaar zijn om de output van de sensor om te rekenen naar microgrammen NO₂ per kubieke meter lucht. Van de Alphasense is bekend dat temperatuur en ozonconcentratie van belang zijn. Er is dus minstens een aanvullende temperatuursensor nodig in de meetkit. De ozon (O₃) kan eventueel ook met een extra sensor in de meetkit worden gemeten, dit wordt in de meetkit van het JRC, de "AirSenseUR" gedaan. Een nadeel van die aanpak is dat de ozonsensor ook geïjkt moet worden en ook verloopt. Welke aanpak uiteindelijk het beste is moet nog blijken.

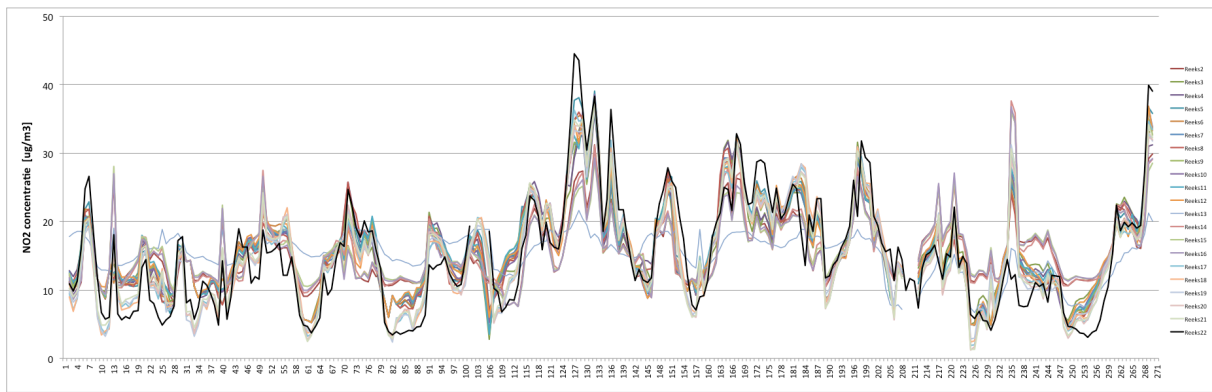
Voor de goedkoopste oplossing van de ijking test het RIVM momenteel een aanpak waarbij de NO₂ sensoren eerst enkele weken worden geïjkt door parallel te meten met een officieel meetpunt waar zowel NO₂ als O₃ beschikbaar zijn. Vervolgens wordt op de feitelijke meetlocatie de benodigde ozon genomen die ofwel ergens nabij wordt gemeten en anders de waarde die uurlijks beschikbaar is in de kaarten die het RIVM berekent. Uit validatietests (Mooibroek, 2014) van het model waarmee de uurlijkse concentraties van ozon over geheel Nederland worden berekend blijkt dat er goede overeenkomst is tussen gemeten en berekende concentraties¹, ook op locaties met veel verkeer.

Een alternatief voor een "ijking op afstand" is om ter plekke van de sensoren ook Palmesbuisjes op te hangen aangezien die een bruikbare absolute ijking van +/- 20% kunnen geven. De sensoren geven dan de uurlijkse en dagelijkse variaties in de NO₂ concentraties terwijl de Palmesbuisjes een indicatie van de ijking verzorgen. De ijking kan dan pas achteraf plaatsvinden.

Ijking in de praktijk

Tijdens de eerste weken van de ijking wordt een relatie gezocht tussen de resultaten van de sensoren (twee voltages per sensor) en de resultaten van de officiële meting. Hierbij worden de ozonconcentratie en de temperatuur van de sensor meegenomen. Een voorbeeld van een set sensoren die worden geïjkt is in figuur B5 weergegeven. Dit betrof een set van sensoren die op het terrein van het RIVM waren geplaatst, direct naast een opstelling met daarin officiële NO₂ en O₃ metingen.

¹ D. Mooibroek, "Verbeterde actuele luchtkwaliteitskaarten, Validatie interpolatiemodel RIO Nederland", RIVM rapport 680704024/2014



Figuur B5, Resultaat van een set van NO2 sensoren gedurende de ijking.

De zwarte lijn toont de officiële, “echte”, NO2 concentratie en de gekleurde lijnen zijn de resultaten van de sensoren, waarbij het resultaat van elke ijking is gebruikt om de spanningen in concentraties om te rekenen. Het is duidelijk dat de meeste sensoren het verloop van de echte concentratie goed volgen. Met name waar de echte concentratie sterk en snel toeneemt doen de sensoren dat ook. Een van de sensoren, aangegeven met de lichtblauwe lijn, laat veel minder variatie in concentraties zien dan de andere sensoren. Na de testperiode is deze sensor niet in het veld ingezet. De figuur maakt ook duidelijk dat de sensoren, ondanks de ijking, niet exact dezelfde concentraties geven. Verschillen van enkele microgrammen komen elk uur voor. Daarbij zijn sommige sensoren vaker wat lager dan sommige andere. De consequentie is dat verschillen van slechts enkele microgrammen, met referentieapparatuur al een uitdaging, met goedkope sensoren nauwelijks tot niet zinvol gemeten kunnen worden.

Een beperking van ijking is dat deze slechts weken of circa aan maand kan duren, veel langer is niet praktisch aangezien dan een te groot deel van de ‘levensduur’ van de sensor aan ijking opgaat en niet aan meting in het veld. Als gevolg komen niet alle omstandigheden die in de buitenlucht kunnen optreden binnen de ijkperiode voor. Een simpel voorbeeld is dat hogere temperaturen nu eenmaal niet voorkomen bij ijking in de winter. Evenzo komen hogere ozonconcentraties niet het gehele jaar voor. Een set van sensoren heeft als experiment bij het RIVM in een klimaatcel een serie vooraf gedefinieerde omstandigheden van ozon, no2, temperatuur en vochtigheid doorlopen. Voor al deze omstandigheden kon een nagenoeg perfecte set van ijkparameters worden gevonden. Toen de sensoren vervolgens in een stedelijke achtergrond met officiële metingen werden vergeleken bleek de beste ijking door de in de praktijk voorkomende combinaties van factoren echter toch net iets anders te zijn. Enkele voorbeelden van een ijking en gevoeligheden van de ijkparameters worden in Bijlage 1 getoond.

Doordat op de veldlocaties met een geschatte ozon concentratie in de ijking van de sensoren moet worden gewerkt zal de spreiding van de NO2 concentraties groter zijn dan op de ijklocaties. Met de huidige technologie van de sensoren is verder tevoren bekend dat de sensoren in meer of mindere mate zullen gaan verlopen. Om het verloop te detecteren en zo mogelijk te corrigeren experimenteert het RIVM samen met anderen met verschillende ijk strategieën. Een mogelijkheid is om de sensoren in groepen van minsten 5-10, redelijk dicht in elkaars omgeving, in te zetten. Denk aan een set van sensoren in verschillende achtertuinen in dezelfde wijk van een stad. Het gemiddelde van alle sensoren zal, is althans de aanname, minder verlopen dan de individuele sensoren. Door de ijking van de sensoren aan het gemiddelde te toetsen kan de afwijking per sensor naar verwachting worden beperkt. Voor de ijking van de sensoren kan worden gekozen om alleen de (nachtelijke) uren te gebruiken, waarbij lokale bronnen minder belangrijk zijn. De zo geijkte sensoren kunnen dan overdag de verschillen in concentraties ten gevolge van lokale bronnen bij de locaties

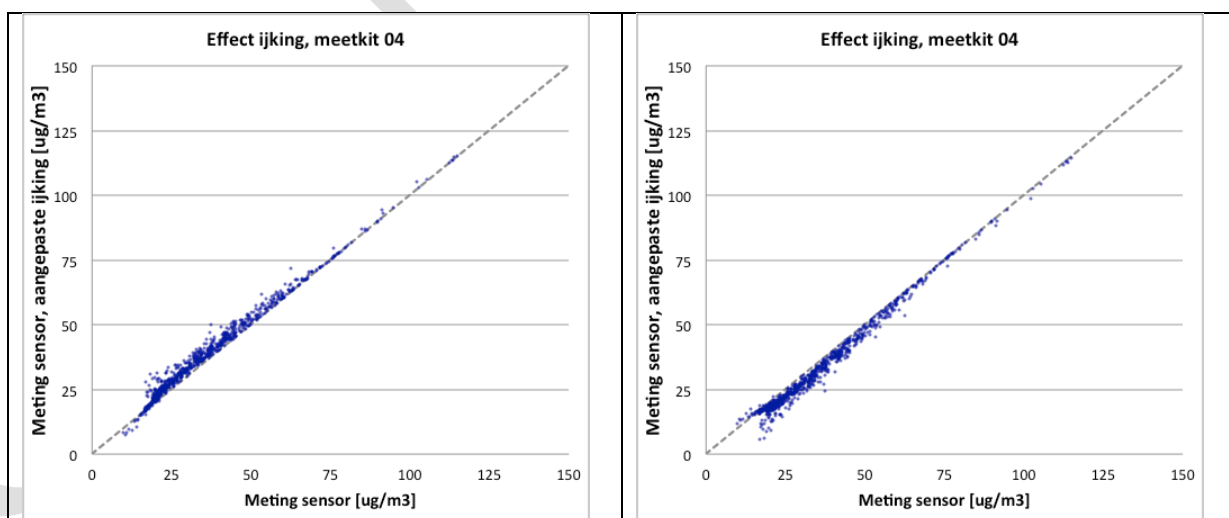
aangeven. Op deze manier kunnen de relatieve verschillen in een kleiner gebied redelijk goed in kaart worden gebracht. Zoals eerder gemeld zijn verschillen tot grofweg vijf microgram per kubieke meter naar verwachting niet goed te meten.

Een alternatief is om de resultaten van de sensoren op de uren dat lokale bronnen minder belangrijk zijn te ijken aan de resultaten van berekende concentraties, zie de berekende kaarten op www.luchtmeetnet.nl. Uit validatie van uurlijkse NO₂ berekeningen van het RIVM is bekend wat de gemiddelde afwijking en de onzekerheid van de kaart met uurlijks berekende NO₂ concentraties zijn. Zo lang als die onzekerheden en afwijkingen kleiner zijn dan die van de sensoren heeft ijking aan de kaart zin, vooral op uren met weinig invloed van lokale bronnen, zoals wegverkeer. De verschillende opties worden in de lopende en komende projecten verder ontwikkeld en getest.

Gevoeligheid van de ijking

De simpelste ijking die het RIVM momenteel voor de Alphasense B43F-NO₂ sensor gebruikt gaat uit van een lineaire afhankelijkheid van het spanningsverschil van de twee uitgangen van de elektronica van de sensor. Hoe groter het spanningsverschil, hoe hoger de gemeten NO₂ concentratie. De temperatuur van de sensor en de hoeveelheid aanwezige ozon zijn ook lineair van invloed op de door de sensor gerapporteerde NO₂ concentratie. Verder blijkt er in de praktijk nog een invloed te zijn van de het spanningsverschil in combinatie met de hoeveelheid ozon in de lucht, een kruisterm in de gevoeligheid. Door gedurende drie tot vier weken de resultaten van elke sensor te vergelijken met die van een officiële meting kan de beste relatie tussen het spanningsverschil, de temperatuur, de hoeveelheid ozon en de echte concentratie voor die omstandigheden worden bepaald. Het RIVM gebruikt in de praktijk het pakket "R" voor de analyses, zie www.r-project.org. De software bepaalt geheel automatisch voor elke sensor die wordt geijkt individueel de beste ijkparameters.

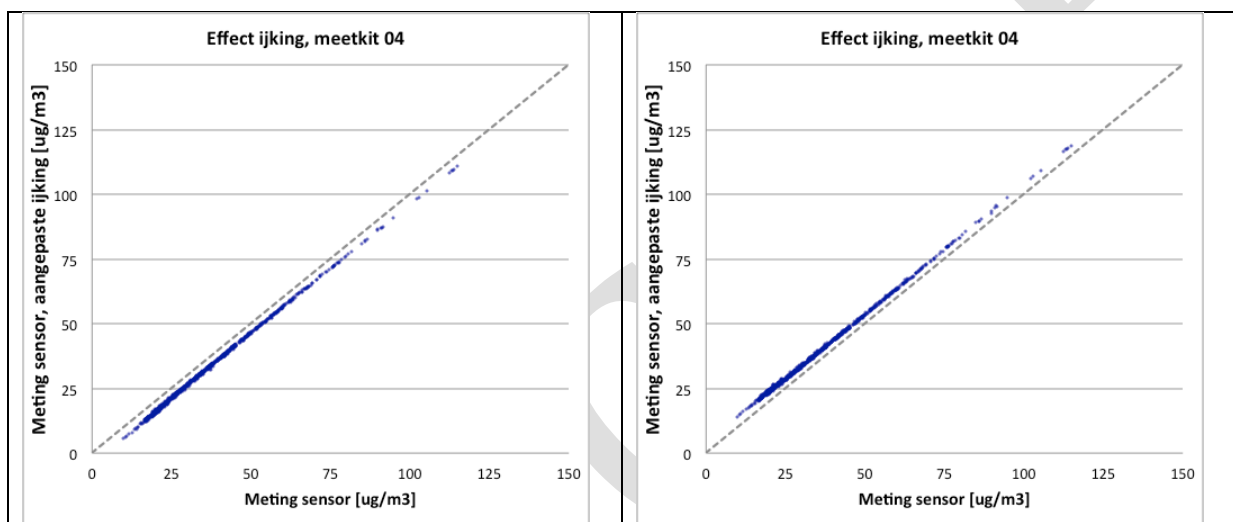
Op de locatie waar de sensor wordt ingezet is geen ozon meting beschikbaar en wordt ofwel de meting van een nabijgelegen station genomen ofwel de uurlijkse kaart van het RIVM gebruikt. Als de ozon ter plaatse van de sensor soms hoger is dan wordt aangenomen en soms lager, dan is het gemiddelde effect op de NO₂ van de sensor beperkt. Het kan uiteraard gebeuren dat de aangenomen ozon systematisch iets te hoog of te laag is. Voorbeelden van de effecten, toegepast op sensor 04 in Rotterdam, worden in onderstaande figuur getoond.



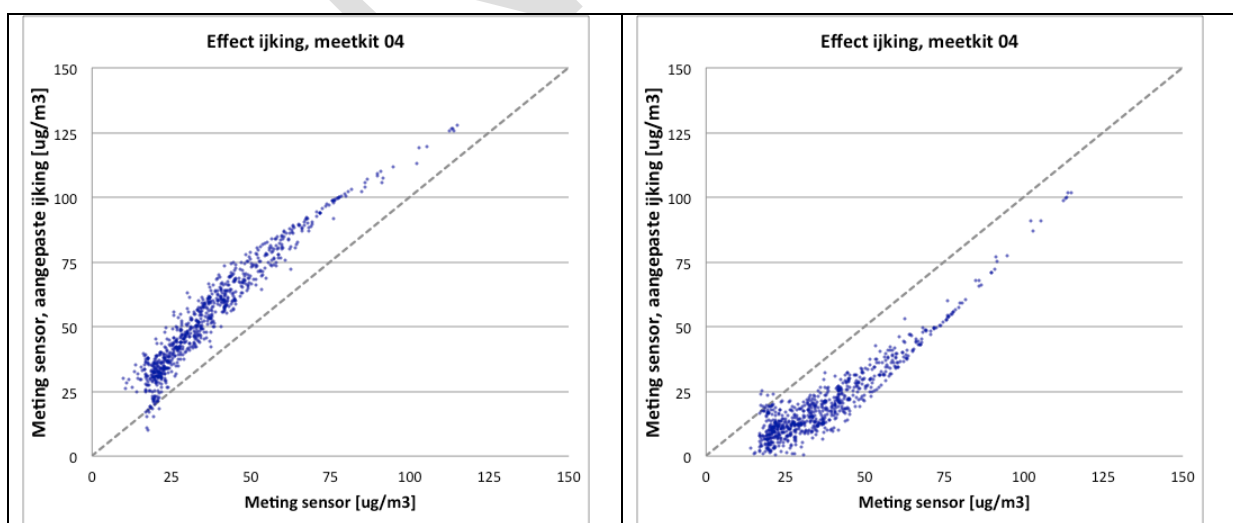
Figuur B6, Effect op de door meetkit 04 gerapporteerde NO₂ concentraties als de ozon 25% lager is dan in de ijking wordt aangenomen (links) of juist 25% hoger is dan aangenomen (rechts).

Omdat de concentratie van de ozon in meerdere termen van de ijking van de sensor voorkomt is het effect van systematische onderschatting beperkt. Bij de hogere NO₂ concentraties is het effect van variaties in de gehanteerde ozon concentratie minimaal. Dit wordt mede veroorzaakt door het fotochemisch evenwicht in de atmosfeer tussen ozon en NO₂, als de een hoog is, dan is de ander laag, en omgekeerd. Bij hoge NO₂ concentraties is er weinig ozon in de lucht, en is het effect van onder- of overschatting klein. Bij de lage NO₂ concentraties is er wel een aanzienlijk effect van de gebruikte hoeveelheid ozon op de NO₂ concentraties. Kleine verschillen in door sensoren gerapporteerde NO₂ concentraties kunnen het gevolg zijn van onvolkomenheden in de gebruikte hoeveelheid ozon.

Het effect van variaties in de gehanteerde temperatuur of in de gevoeligheid van de sensor wordt in figuren B7 en B8 getoond.



Figuur B7, Effect op de door meetkit 04 gerapporteerde NO₂ concentraties als de temperatuur 25% lager is dan in de ijking wordt aangenomen (links) of juist 25% hoger is dan aangenomen (rechts).



Figuur B8, Effect op de door meetkit 04 gerapporteerde NO₂ concentraties als de gevoeligheid van de sensor 25% lager is dan in de ijking wordt aangenomen (links) of juist 25% hoger is dan aangenomen (rechts).

Het is duidelijk dat de gevoeligheid de meest bepalende factor is in de ijking van de sensoren. Het effect van een juiste ijking is relatief het grootst bij de lage NO₂ concentraties, bij hogere concentraties is het relatieve effect beperkt. De fabrikant, Alphasense, specificeert voor de gevoeligheid: "Operating life: months until 50% original signal (24 month warranted) > 24". Oftewel, de gevoeligheid van de sensor kan over een periode van twee jaar met circa 50% afnemen. Dit is dus een punt waarmee rekening gehouden moet worden.