

DE EVOLUTIE VAN EEN FIJNSTOF-SENSOR

Is een fijnstof sensor in te zetten als een referentie gelijkwaardig meetinstrument?

Het is nu gebruikelijk om veel sensoren in te zetten voor een gemiddelde $PM_{2,5}$ meting die goed genoeg overeenkomt met referentie-apparatuur. Is het misschien toch mogelijk om met één enkele $PM_{2,5}$ fijnstof-sensor betrouwbare $PM_{2,5}$ metingen uit te voeren?

ERWIN HARTOGSVELD & JAKOB PIJNENBURG

| Grenswaarden

Omdat er *wettelijke* grenswaarden voor luchtkwaliteit zijn is het logisch dat je die grenswaarden alleen mag vergelijken met metingen die ook officieel en correct zijn uitgevoerd. Voor Nederland betekent dit dat metingen moeten worden uitgevoerd volgens de Europese normen, met daarin beschreven apparatuur en handelingen. De Europese lidstaten zijn verplicht deze Europese standaard (CEN) normen onveranderd op te nemen als nationale standaard meetmethode. Dat geldt niet alleen voor fijnstof maar ook voor andere luchtkwaliteit bepalende stoffen zoals stikstofdioxide, ozon of zwaveldioxide en straks ultrafijnstof.

| Indicatief meten: ontwikkeling van fijnstofsensoren

Tot ongeveer 2010 werden fijnstof luchtkwaliteitsmetingen alleen uitgevoerd

volgens de twee in het kader beschreven officiële en kostbare methoden. De eerste fijnstof sensoren kwamen rond 2010^{1,2} beschikbaar en werden vanwege de lage kosten enthousiast toegepast.

Er zijn nu een enorm aantal fijnstofsensoren in een groot aantal netwerken actief: urad, luft-daten, airqo, airbg, opensense, yakkaw, econet, airkaz, ccde, ambente, green air, purple air en ga zo maar door.

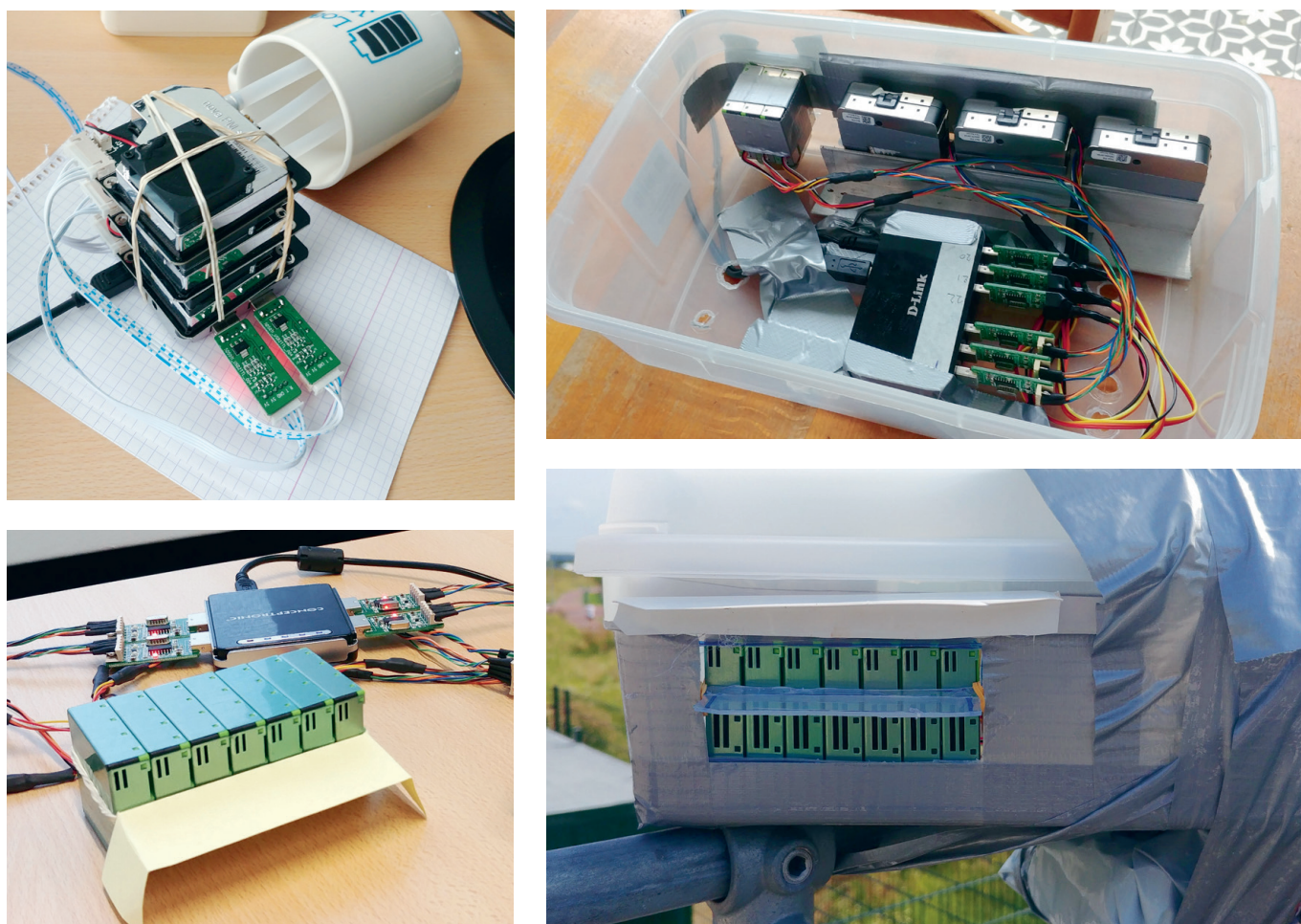
| De kern van het fijnstofsensoren probleem

Met elke nieuwe ontwikkeling krijg je ook nieuwe problemen;

- De sensoren meten niet de massa fijnstof (in microgram per kubieke meter) maar tellen optisch het aantal deeltjes, tot 10 micrometer groot. Afhankelijk van het type sensor kunnen ze deeltjes pas tellen als ze groter zijn dan 0,3 tot 1,0 micrometer. Op basis van een gemiddelde massadichtheid wordt het aantal deeltjes *omgerekend* naar de massa in $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

- De aanname van deze gemiddelde massadichtheid geeft extra onzekerheid in de uitkomst (dit geldt eerlijkheidshalve voor alle optische meetmethodes, dus ook voor meer officieel gebruikte meetapparaten als die van Palas en Grimm).
- Een bijkomend nadeel van deze methode is dat deeltjes kleiner dan ongeveer 0,3 – 1,0 micrometer niet worden gedetecteerd, terwijl dit juist de deeltjes zijn die bij verbrandingsprocessen vrijkomen (dit geldt ook voor alle andere optische meetmethodes).
- Het blijkt dat veel sensoren niet alle deeltjes tussen 2,5 en 10 micrometer detecteren. Dat kan de inzet van sensoren bij bronnen met iets groter fijnstof zoals bouwplaatsen, op- en overslag en veehouderijen beperken.
- Sensoren worden meestal niet goed of helemaal niet onderhouden.
- Sensoren worden enkel ingezet, niet in duplo of liever nog triplo. Hoe weet je (zonder andere controle of kalibratie) of er iets mis is met een sensor?
- Ook in een sensor-netwerk moet op een of andere manier controle en kalibratie volgens de Europese normen worden toegepast en worden beschreven.

Wettelijke grenswaarden voor luchtkwaliteit mag je alleen vergelijken met metingen die officieel en correct zijn uitgevoerd



Figuur 1. duur- en gelijkwaardigheidstesten. SDS011, NextPM en Sensirion SP530.

- En tenslotte, een speciale uitdaging, bij hogere luchtvochtigheid worden de vochtdeeltjes ook geteld als stofdeeltje.

Het fundamentele probleem van een fijnstofsensoren en een fijnstofsensoren-netwerk is dus de betrouwbaarheid van de fijnstof meetdata. Het grootste deel van de data van deze sensor-netwerken is hooguit indicatief richtinggevend voor 24-uurs gemiddelde en alleen 'door de ooghalen kijkend' met middeling van veel meetdata te gebruiken.

| Fijnstofsensoren in Nederland

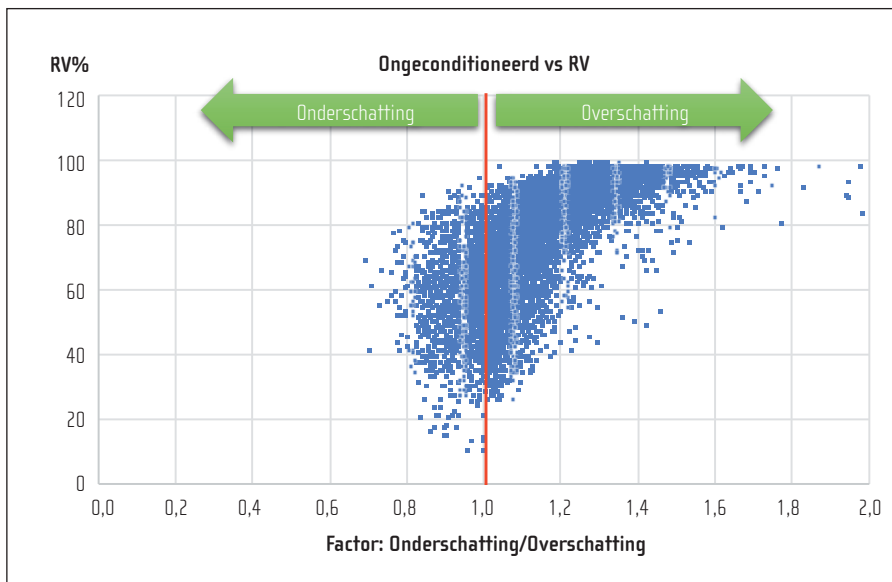
Het RIVM is in de winter 2016-2017 gestart met een Citizen Science project met de vuurwerksensoren^{3,4}. Het RIVM werkt sinds 2018 aan experimentele kalibratie^{5,6,7} van de sensoren waarbij de metingen van het officiële Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit als referentie worden gebruikt. Deze correctie is geschikt voor de, dankzij *Luftdaten/Sensor.Community*, meest gebruikte fijn- →

De gouden standaard

De meetbasis voor fijnstof is vastgelegd in een referentiemethode, de NEN12341, waarin het bepalen van fijnstof door middel van een filterweging van 24-uurs gemiddelden massaconcentraties wordt beschreven. Dit is een 24-uurs gemiddelde meting die door het aanzuigen van een filter via een specifieke aanzuigkop beladen wordt en in een gecertificeerde weegkamer volgens officieel protocol wordt gewogen. Bepaald geen praktische methode voor het volgen of toetsen van de fijnstof luchtkwaliteit. Duur, traag, en alleen maar 24-uurs gemiddelden fijnstofconcentraties die door de procedures in de geconditioneerde weegkamer vaak pas na 6 weken beschikbaar zijn!

De dagelijkse standaard

Om het praktisch en werkbaar te houden is deze bovengenoemde referentiemethode aangevuld met de Europese standaard norm NEN 16450 (Buitenlucht - Geautomatiseerde meetsystemen voor de meting van de concentratie van fijnstof (PM_{10} ; $PM_{2,5}$)) waarin onder andere beschreven is hoe door het gebruiken van de referentiemethode als controlemiddel er ook *geautomatiseerde* fijnstofmeetmethoden toegepast kunnen en mogen worden. Deze geautomatiseerde fijnstofmeetmethoden produceren "continue" fijnstofmetingen, uurgemiddelden in de praktijk, en zijn geaccepteerd als valide meetmethode voor fijnstof, als periodieke kalibratie met de referentiemethode wordt toegepast en aangetoond is dat die metingen *daggemiddeld* gelijkwaardig zijn aan de referentiemethode. Daarnaast moet er ook nog een TÜV type goedkeuring zijn volgens dezelfde norm. Alleen dan mag de monitor officieel worden ingezet.



Figuur 2. Ongeconditioneerde luchtstroom geeft overschatting bij hoge luchtvochtigheid

stofsensoren in Nederland, de Nova Fitness SDS011. De data van de sensoren worden bij deze kalibratie niet als individuele sensoren maar als groep of netwerk van sensoren gebruikt. Ook dan valt op dat de sensoren zeer gevoelig zijn voor vocht. Bij relatieve luchtvochtigheid boven 90% geven de sensoren 2 tot 5 maal hogere concentraties dan de officiële meetwaarden. Ook bij lagere luchtvochtigheid, vanaf 60%, wordt er vocht als fijnstof gemeten. Correcties zijn dus wel mogelijk, hoewel deze bij zeer hoge luchtvochtigheid niet alle invloed van vocht kunnen compenseren. Wat de correcties doen bij lage luchtvochtigheden (<50%) is nog niet helemaal duidelijk.

| $PM_{2,5}$ wel, PM_{10} niet

De RIVM-meetnetkalibratie voor $PM_{2,5}$ is vrij eenduidig en levert op meetnetniveau, dus geaggregeerd, goede resultaten op. Voor PM_{10} hebben de meetresultaten meer onzekerheid. Dat de sensoren de grovere fijnstofdeeltjes niet goed detecteren speelt een rol.

| Testen van verschillende sensoren

Begin 2019 kreeg de Regionale Uitvoerings Dienst Zuid-Limburg (RUD-ZL) de vraag van de gemeente Maastricht of het mogelijk was om

een meetnetwerk van fijnstof sensoren op te zetten. Op dat moment was het meetnet van *Sensor.Community* al flink aan het groeien en de gemeente wilde daarbij aansluiten. Om inzicht te krijgen in de kwaliteit en duurzaamheid van de zelfbouwsensoren is een onderzoek gestart door op vijf vaste luchtmeet stations met referentie-apparatuur verschillende typen sensoren te testen. In totaal hingen er per station vijf sensoren die vergeleken zijn met referentie- en referentie-gelijkwaardige fijnstof monitoren (BAM1020 en Leckel Seq-47/50) over een periode van een jaar.

| Conclusies uit de verschillende onderzoeken

Er is te veel overschatting van fijnstof concentraties bij hogere luchtvochtigheid, grote onderlinge spreiding van de metingen, onvoldoende vuil en insectenbescherming, en een wiferverbinding is eigenlijk niet wenselijk. Bij de onderlinge vergelijking van verschillende

typen sensoren geeft de Sensirion SPS30 voor $PM_{2,5}$ fijnstof de beste meetresultaten

De uitdaging was deze Sensirion SPS30 sensor zodanig aan te passen zodat deze ook bij hogere luchtvochtigheid betrouwbaar $PM_{2,5}$ fijnstof meet,

plug&play is, langdurig buiten kan hangen en er representatief uitziet. De RUD-ZL ging, dankzij de opdracht van de gemeente Maastricht, deze uitdaging aan en is gaan samenwerken met Marvin Tjon van de Luchtwachters Delft (verantwoordelijk voor software, website, database, datacommunicatie en sensor ontwikkeling) en Roderick Peters van Citizen Science Community Nijmegen (verantwoordelijk voor pcb- en 3D design, elektronica en sensor ontwikkeling). Het product van deze samenwerking en de basis voor dit artikel is de 'Ohnics'-sensor (OHN-01), gebaseerd op de hierboven verkozen Sensirion SPS30 sensor. Deze is op verschillende punten aangepast.

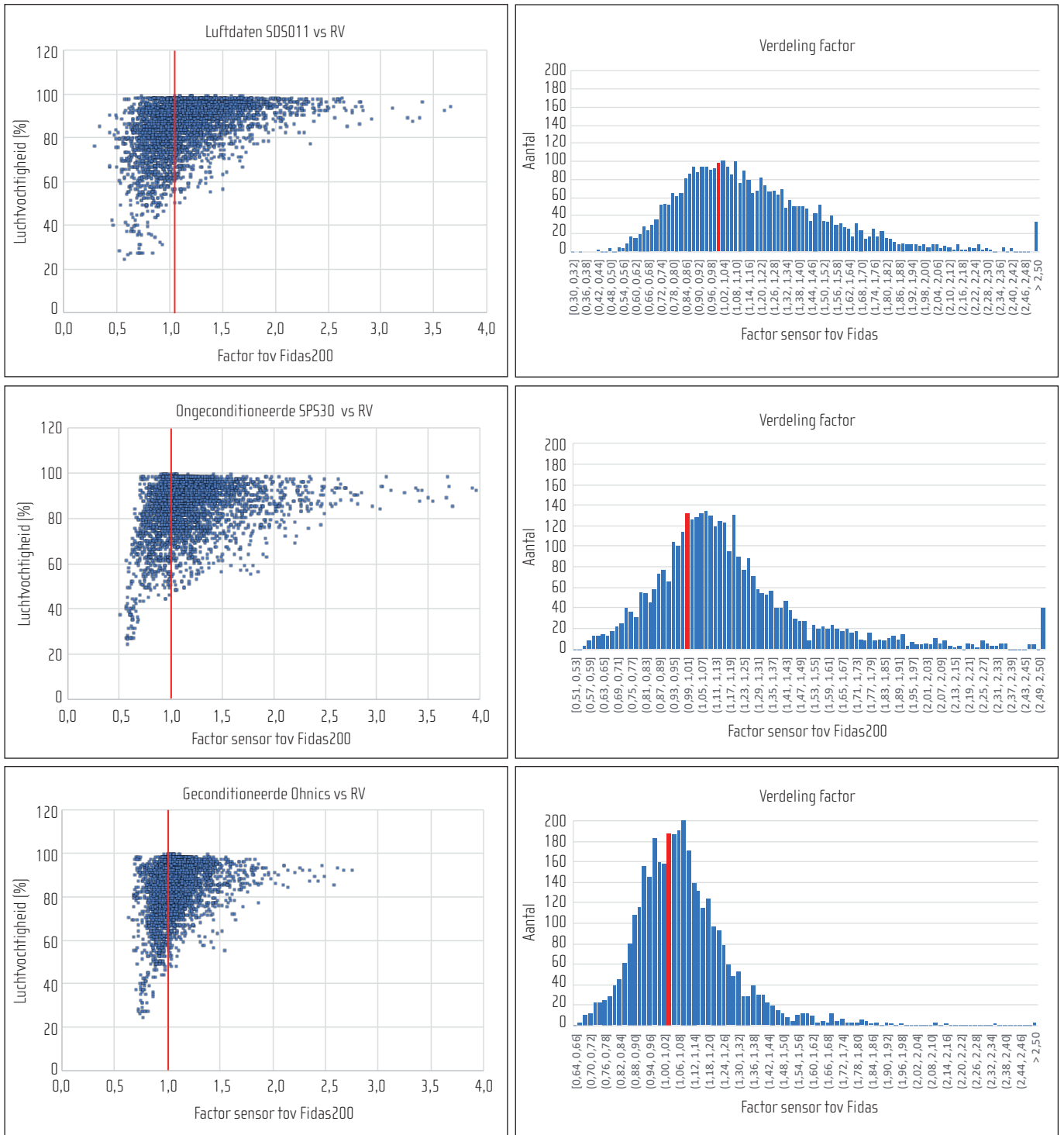
Luchtvochtigheid

Zoals al vermeld overschatten sensoren de fijnstof concentratie bij hogere luchtvochtigheid. Door net zoals bij de referentie-gelijkwaardige meetapparatuur conform NEN 16450 de aangezogen luchtstroom rV afhankelijk te conditioneren zou de overschatting bij hoge luchtvochtigheid minimaal moeten zijn. Er zijn vele prototypes en conditioneringen geprobeerd. In Figuur 2 staan twee SPS30 sensoren, een sensor met een geconditioneerde luchtstroom en één zonder conditionering. Door de meetwaarde van de ongeconditioneerde sensor te delen door de geconditioneerde kom je op een factor. Figuur 2 toont deze factor ten opzichte van de heersende luchtvochtigheid. Bij het stijgen van de relatieve vochtigheid is er een duidelijke overschatting van de stofconcentratie.

Het effect van conditioneren van lucht

In de periode van 26-08-2021 tot 31-03-2022 zijn er in Maastricht metingen uitgevoerd met een 'Lufdaten' sensor (SDS010), een ongeconditioneerde Sensirion SPS30 en een geconditioneerde Sensirion SPS30 (Ohnics) sensor. De meetwaarden (3659 uurwaarden) zijn vergeleken met een gekalibreerde Palas Fidas200 automatische fijnstof monitor (Factor = Sensor/Fidas). Deze Palas Fidas200 is een refe-

Het fundamentele probleem van een fijnstofsensoren is de betrouwbaarheid



Figuur 3. Het effect van conditioneren

rentie-gelijkwaardig meetapparaat, de opvolger van de BAM-1020. In Figuur 3 is duidelijk zichtbaar dat bij hogere luchtvochtigheid de factor van de ongeconditioneerde sensoren omhoog gaat, wat overschatting van de fijnstof concentratie betekent. Bij de geconditioneerde Ohnics sensor is dit effect veel minder.

Datacommunicatie

Een aandachtspunt van de reguliere sensor is de afhankelijkheid van wifi. Bij het wijzigen van het wifiwachtwoord door de deelnemer of slecht bereik buitenshuis is een betrouwbare en langdurige ontvangst niet gegarandeerd. Wifi, LoRa, 2G en LTE-M zijn als alternatieve

communicatiesystemen onderzocht. Er is vanwege de wereldwijde dekking, kosten en de betrouwbare verbinding (uptime >98%) gekozen voor het LTE-M systeem. Met deze communicatiemethode is het alleen nog maar een kwestie van ophangen, het leveren van een voeding en de sensor gaat automatisch elke minuut →



Links:
Figuur 4. Prototypes

Boven:
Figuur 5. De Ohnics
OHN01

data ($PM_{2.5}$, PM_{10} , Luchtvochtigheid en temperatuur) communiceren naar de eigen website en naar het samen meten dataportaal van het RIVM¹⁰.

De behuizing

Voor het uiteindelijk project is een weersbestendige behuizing ontworpen die eenvoudig in elkaar kan worden gezet (Figuur 5). De gedachte hierachter was om de sensor samen met de Maastrichtse deelnemers in workshops in elkaar te zetten. Door Covid is dat er niet van gekomen.

Links:
Figuur 6. Kalibratie-
opstelling Philipsweg
Maastricht

De kalibratie en de betrouwbaarheid

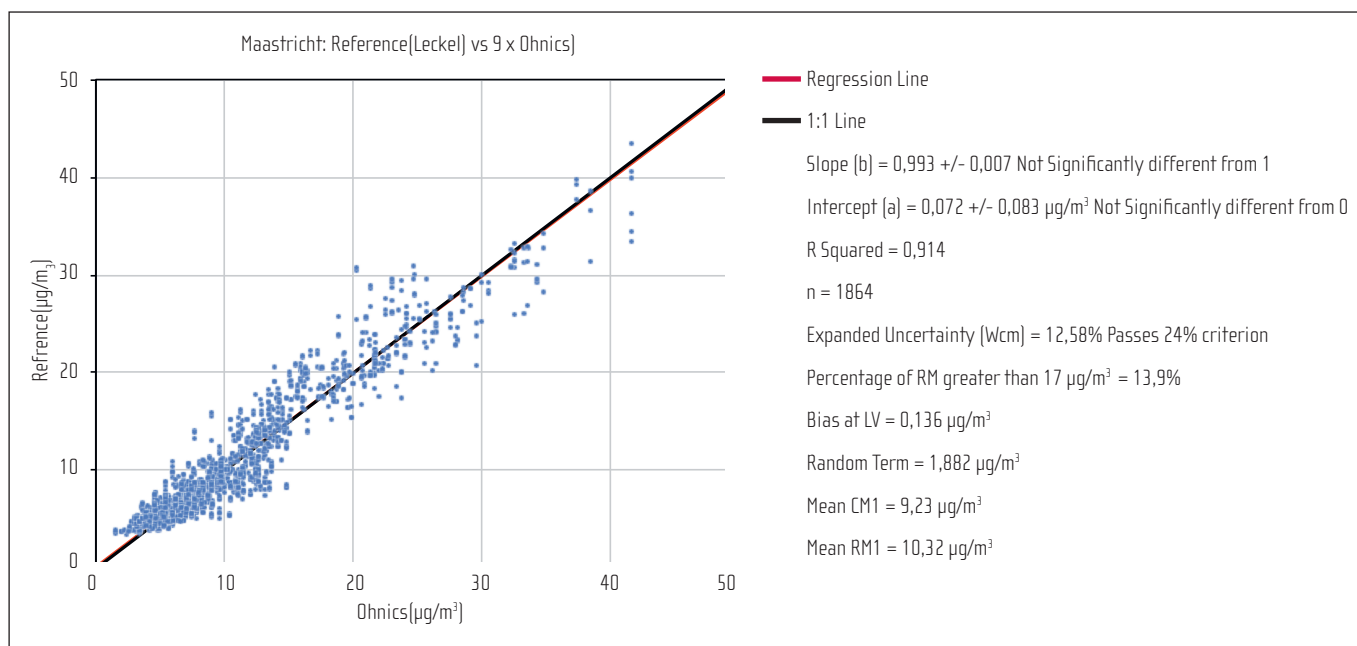
Sinds de start van het project in Maastricht met de aangepaste Ohnics sensor in 2021 wordt de kwaliteit van de metingen gevolgd door continue vergelijking op drie officiële meetstations met referentie en referentie-gelijkwaardige fijnstof metingen (twee verkeersbelaste stations en één stadsachtergrond station). Dit gebeurt per station in triplo, drie sensoren per referentie-vergelijking.

De resultaten

De meetwaarden van deze negen Ohnics sensoren zijn op drie verschillende locaties vergeleken met referentie $PM_{2.5}$ meetapparaten (de Leckel). In totaal heeft dit een meetset van 1864 dagwaarden opgeleverd. De resultaten zijn verwerkt in de Equivalence Tool V3.1. De data van die negen sensoren is gecorrigeerd, dat wil



Er werd een uitgebreid onderzoek gestart met vijf verschillende sensoren in vijf verschillende meetstations



Figuur 7. Gecorrigeerde dagwaarden Ohnics vs. Referentie (Leckel)

zeggen er is een correctiefactor toegepast zoals bij automatische fijnstof meetapparatuur gebruikelijk is. Na een correctie (slope: 1,165 en intercept: -2,797) ziet de regressie grafiek eruit als in Figuur 7. De toegestane onzekerheid volgens EU Air Quality Directive 2008/50/EC is 25%. Met de gevonden onzekerheid van 12,58% voldoet de Ohnics ruimschoots aan de toegestane 25%.

| De projecten

Voor de RUD-ZL met als opdrachtgever gemeenten en de Provincie Limburg is het belangrijkste doel van de doorontwikkelde (Ohnics) sensor de zogenoemde *burgerparticipatie* projecten. Er zijn heel veel burgers met zorgen en vragen over lokale luchtkwaliteit. Gemeenten hebben met de Ohnics-sensor een instrument waarvan de meetresultaten na stroomaansluiting direct zichtbaar zijn op een eigen website of de Ohnics-website^{8,9}. Met deze doorontwikkelde sensor gebeurt dat op een manier waarop de RUD-ZL er kwalitatief achter kan staan.

Sinds 2021 is er een fijnmazig meetnetwerk van 65 sensoren in Maastricht actief en zal begin september 2023 het *Grenzeloos Meten* project in Noord Limburg van start gaan, waar de RUD-ZL samen met de Provincie Limburg, Gemeente Peel en Maas, Horst aan de Maas en Venray op 45 plaatsen in de regio PM_{2,5} gaat meten. Via Luchtwachters Delft en Citizen Science Community

Nijmegen meten er ook Ohnics-sensoren in Lent, Nijmegen, Delft en Deventer.

In de winter van 2022/2023 zijn er een aantal Ohnics sensoren toegepast in een houtstook onderzoek waarvan we resultaten in het najaar van 2023 verwachten. De mogelijkheden voor inzet bij bron-onderzoek door middel van gelijktijdige boven en benedenwindse metingen met gebruik van *minuutgemiddelde* meetwaarden wordt daarmee verder onderzocht.

| Conclusies

Het is dus toch goed mogelijk om met één enkele fijnstofsensor betrouwbare PM_{2,5} meetresultaten te verkrijgen! Voorwaarden zijn de aanpak van de gevoeligheid voor het vochtgehalte in lucht en een controle en kalibratie-programma met referentie-gelijkwaardige apparatuur. In de NEN 16450 voor het testen van referentie-gelijkwaardige apparatuur is vastgelegd dat er minimaal eens per drie maanden de temperatuur, de luchtdruk en de flow wordt getest. Daarnaast is een TÜV-type goedkeuring vereist. Aan deze vereisten voor het predicaat referentie-gelijkwaardige apparatuur kan (uit kostenoverwegingen) niet worden voldaan. De minuutgemiddelde metingen blijken heel interessant om bron-onderzoek zoals bij hout-rook overlast te doen. De minuutgemiddelde metingen laten dan hele hoge, kortdurende piekmetingen in fijnstofbelasting zien die met uur of daggemiddelden (bijna) volledig worden

weggemiddeld. Hier komen we in een later artikel op terug. ■

Erwin Hartogsveld en Jakob Pijnenburg zijn technisch adviseur lucht bij de Regionale Uitvoeringsdienst Zuid-Limburg.

Referenties

1. Chris Nafis, Air Quality Monitoring; Automatically measuring and graphing Air Quality with an inexpensive device (Shinyei Model PPD42NS Dust Sensor) 2012 <https://www.howmuchsnow.com/arduino/airquality/grovedust/>
3. <https://www.samenmeten.nl/vuurwerk-2016-2017>
4. <https://www.mdpi.com/2073-4433/10/8/445>
5. <https://samenmeten.nl/dataportaal/kalibratie-van-fijnstofsensoren#:~:text=Met%20kalibreren%20bedoelen%20we%20het,temperatuur%2C%20de%20sensor-meting%20kunnen%20be%C3%AFnvloeden.>
6. <https://samenmeten.nl/sites/default/files/2021-03/P1%20Joost%20Wesseling%20-%20Kalibratie%20sensoren%20en%20Jaargemiddelden.pdf>
7. https://samenmeten.nl/sites/default/files/2021-05/ECSA_07may21_RIVM_JWesseling_0.pdf
8. <https://ohnics.online/kaart/>
9. <https://ohnics.online/kaart/#Maastricht>
10. <https://samenmeten.rivm.nl/dataportaal/>