

Ontwikkeling en implementatie van een platform voor Openbare informatie over luchtkwaliteit, sensor Metingen en Citizen Science

Joost Wesseling *, Henri de Ruiter, Christa Blokhuis, Derko Drukker, Ernie Weijers, Hester Volten, Jan Vonk, Lou Gast, Marita Voogt, Peter Zandveld, Sjoerd van Ratingen en Erik Tielemans

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), Postbus 1,
3720 BA Bilthoven, Nederland

* Correspondentie: joost.wesseling@rivm.nl; Tel.: +31- (0) 30-274-9111

Ontvangen: 29 juni 2019; Geaccepteerd: 30 juli 2019; Gepubliceerd: 1 augustus 2019

Samenvatting: Het gebruik van goedkope sensoren voor luchtkwaliteitsmetingen neemt snel toe, met een bijbehorende toename van het aantal burgers dat zelf de luchtkwaliteit meet. Dit heeft grote implicaties voor traditionele monitoring van de luchtkwaliteit zoals uitgevoerd door Milieubescherming Agencies. Hier reflecteren we over de ervaringen van het Nederlands Instituut voor Volksgezondheid en de Omgeving (RIVM) met behulp van goedkope sensoren, met name NO₂ en PM₁₀ / PM_{2.5} sensoren, en aanverwante burgerwetenschap, de afgelopen jaren. Specifiek bespreken we de Nederlandse innovatie Programma voor milieumonitoring, dat de ontwikkeling van een kennisportaal omvat en sensorgegevensportaal, nieuwe kalibratiebenaderingen voor sensoren en modellering en assimilatie technieken voor het opnemen van deze onzekere sensorgegevens in luchtvervuilingsmodellen. Eindelijk, wij belichten enkele van de uitdagingen die gepaard gaan met het gebruik van goedkope sensoren voor luchtkwaliteit monitoring, en geef enkele specifieke use-cases. Onze resultaten laten zien dat goedkope sensoren dat kunnen een waardevolle aanvulling zijn op de traditionele monitoring van de luchtkwaliteit, maar tot nu toe het gebruik ervan in officieel opzicht monitoring is beperkt geweest. Er is meer onderzoek nodig om robuuste kalibratiemethoden te ontwikkelen de lopende werkzaamheden zijn ook gericht op een beter begrip van de behoeften van het publiek aan luchtkwaliteit informatie om het gebruik van goedkope sensoren te optimaliseren.

Sleutelwoorden: luchtkwaliteit; goedkope sensoren; burgerwetenschap; toezicht houden

1. Inleiding

Luchtvervuiling wordt beschouwd als een voortdurende bedreiging voor de volksgezondheid en is gekoppeld aan een schatting Elk jaar 400.000 voortijdige sterfgevallen in de EU [1]. Gezien de complexiteit en de impact van luchtvervuiling, de EU heeft de luchtkwaliteitsrichtlijnen ingevoerd om grens- en streefwaarden vast te stellen voor concentraties van belangrijke luchtverontreinigende stoffen [2,3]. Deze richtlijnen schrijven ook in detail voor hoe de omgevingslucht moet worden gemeten

kwaliteit met behulp van gestandaardiseerde referentiemethoden, met goed gedefinieerde kwaliteitsvereisten. Vandaar, regulerende monitoringnetwerken zijn over het algemeen strikt gereguleerd en gebaseerd op een beperkt aantal geavanceerde, kwaliteitszekere en daarom dure meetstations. Vanwege hun lage ruimtelijkheid resolutie, is het voor regelgevende meetnetwerken vaak moeilijk om aan alle lokale eisen te voldoen populaties die om gedetailleerde informatie over verontreinigende stoffen vragen, bijvoorbeeld in hun woonplaats [4]. In plaats daarvan wordt dergelijke informatie meestal afgeleid van modellen met aanzienlijke onzekerheden. Naarmate slimme technologie en Internet of Things (IoT) steeds gangbaarder worden, is er de belofte van goedkope sensoren die grootschalige monitoring mogelijk maken in dichte, aanvullende netwerken [5,6]. De groeiende populariteit van kleine goedkope gas- en deeltjessensoren, microcontrollers en

met open source-programma's kunnen burgers steeds vaker gegevens over luchtvervuiling verzamelen. Burgers beginnen te meet de luchtkwaliteit in hun eigen achtertuin, vorm hun eigen buurtwacht en reik uit naar Environmental Protection Agencies (EPA's) voor kennis en begeleiding, maar ook met hun sensor resultaten. Er bestaan al veel voorbeelden van burgerwetenschappers die luchtverontreinigende stoffen meten [7]. Een voorbeeld van een grootschalig en succesvol burgerwetenschappelijk project is Lufdaten [8]. Dit project is gestart door de Open

Knowledge Lab op lokaal niveau in Stuttgart (Duitsland), wordt nu ondersteund in zeven talen en heeft deelnemers van over de hele wereld. Evenzo, geïnspireerd door technologische vooruitgang, veel gemeenten werken aan het concept om een 'slimme stad' te worden, gebaseerd op het uitgangspunt dat data verzameling uit allerlei bronnen, waaronder sensoren, helpt steden efficiënt te beheren.

Voor autoriteiten en wetenschapsgemeenschappen kunnen sensoren een goedkope aanvulling bieden, of uiteindelijk zelfs alternatief voor de referentie- en officiële equivalente meetmethoden die zijn gedefinieerd in de Europese luchtkwaliteitsrichtlijn (2008/50 / EG). Met goedkope sensoren kunt u veel bewaken hogere ruimtelijke en temporele resolutie. Bovendien, vanwege hun lage kosten, deze monitoringssystemen beschikbaar komen voor andere gebruikers en gebruiken. Bijvoorbeeld, wanneer gekoppeld aan GPS en / of smartphones, burgers konden hun blootstelling schatten als ze woonden in complexe stedelijke gebieden, verkeersknooppunten, straat ravijnen en andere vervuilde plaatsen. De toenemende belangstelling voor goedkope luchtkwaliteitssensoren brengt naast grote kansen ook enkele belangrijke uitdagingen met zich mee. Momenteel is de kwaliteit van de sensor metingen zijn een probleem, omdat de prestaties ruimtelijk en tijdelijk kunnen variëren [9]. Dit maakt het moeilijk te interpreteren sensorgegevens, vooral voor burgerwetenschappers met beperkte achtergrond en statistische kennis. Bovendien maken autoriteiten zich vaak zorgen over metingen van de luchtkwaliteit van sensoren zullen worden gebruikt in juridische procedures, ondanks het feit dat ze geen officiële status hebben.

Als reactie op deze snelle technologische en maatschappelijke ontwikkelingen, RIVM en Nederlanders Ministerie van Infrastructuur en Waterbeheer is een programma gestart om de nationale te innoveren luchtkwaliteit meetnetwerk. Dit "Innovatieprogramma voor milieumonitoring (IPEM) heeft als doel kleine sensoren, burgerwetenschap en nieuwe modelleringstechnieken als integraal op te nemen onderdeel van het monitoringstelsel. De IPEM is gestart in 2016 en duurt ongeveer vijf jaar. De belangrijkste mijlpalen van het programma zijn weergegeven in figuur 1. De verwachting is dat de huidige Nederlandse netwerk voor het meten van luchtkwaliteit zal evolueren naar een hybride systeem van een hoogwaardige referentiebasis aangevuld met grote hoeveelheden sensorgegevens verzameld door burgerwetenschappers, gemeenten, bedrijven, etc. Uiteindelijk is het doel van het programma een crowdsourced systeem dat lokaal zorgt gemeenschappen met gedetailleerde milieugegevens, terwijl ze tegelijkertijd de nationale bevolking verrijken controlesysteem. Even belangrijk is dat deze nieuwe aanpak experts aanmoedigt om te communiceren methoden en bevindingen op een manier die hun publiek aanspreekt.

Als nationale EPO is het een belangrijke taak voor het RIVM om een onafhankelijke en onpartijdige rechter te blijven van luchtkwaliteitsbevindingen, ongeacht of deze zijn verkregen door officiële metingen of door nieuwe sensortechnologie. Bijgevolg zijn er enkele uitdagingen die specifiek van toepassing zijn op EPA's. Voor het kan bijvoorbeeld verleidelijk zijn voor EPA's om prioriteit te geven aan het testen van sensoren en te wachten om ermee aan de slag te gaan

burgerwetenschappers totdat sensoren voldoen aan officiële kwaliteitscriteria en kunnen worden gebruikt voor monitoring. Echter, om de burgerwetenschap te ondersteunen en om de gegevens goed te kunnen gebruiken, moet ook een EPO worden bedacht manieren om de gegevens te kalibreren en te gebruiken, en om de infrastructuur en communicatiekanalen op te bouwen de burgerwetenschapsgemeenschap faciliteren, rekening houdend met hun behoeften en feedback. In Bovendien is het misschien het beste voor officiële monitoringdoeleinden wanneer sensormetingen dat zijn gestandaardiseerd, dat wil zeggen dat iedereen dezelfde sensor en meetprocedure gebruikt. Dit zou echter wel beperking van de vrijheid van burgerwetenschappers en zou de vooruitgang kunnen belemmeren omdat zij een breed scala van werknemers in dienst hebben

sensoren in het veld bieden een echt 'testlab'. Daarom moet een EPA zijn eigen balans vinden potentiële voorkeuren met die van een breder scala van belanghebbenden, inclusief belanghebbenden die dat zijn traditioneel enigszins buiten het bereik van een nationale EPO: burgers, gemeenten en ondernemingen. Allemaal dit moet gebeuren terwijl tegelijkertijd de traditionele EPA-taken worden uitgevoerd, waaronder veel wettelijke verplichtingen. Deze uitdagingen vereisen dus een aanpak die flexibel genoeg is om geschikt voor verschillende gebruikers en gebruiken, terwijl tegelijkertijd voldoende is gefocust om naar toe te werken het doel van een systeem waarbij officiële metingen en burgermetingen worden gecombineerd.

Dit artikel beschrijft de bouwstenen van ons "Innovatieprogramma voor het milieu Monitoring", dat bestaat uit de ontwikkeling van een kennisportaal dat openstaat voor bijdragen van anderen, nieuwe kalibratiebenaderingen voor goedkope en onzekere sensoren, een (sensor) gegevensportaal met visualisaties voor burgers en modellering en assimilatietechnieken om deze op te nemen onzekere sensorgegevens in luchtvervuilingsmodellen. Onze aanpak zal worden geïllustreerd met een paar use-cases voorbeelden. De volledige technische details van de voorbeelden worden niet in dit overzichtsartikel gepresenteerd, maar zal in een later stadium worden beschreven.

Figuur 1. Roadmap van het Nederlandse innovatieprogramma voor milieumonitoring (IPEM) en zijn

bijbehorende mijlpalen.

Belangrijke wetenschappelijke vragen in verband met dit innovatieprogramma omvatten de algemene vraag onzekerheid van een groot aantal goedkope sensoren in vergelijking met die van de traditionele monitoring systemen met lage ruimtelijke resolutie, die conceptueel in dit artikel worden besproken. Voorts zullen we ervaringen bespreken met burgerwetenschappelijke benaderingen die EPA's helpen nieuwe wetenschap vorm te geven – maatschappelijke relaties op een meer interactieve en reflexieve manier. Daarbij zullen onze reflecties helpen verbetering van het inzicht in de waarde van goedkope luchtkwaliteitssensoren in de bredere context van lucht kwaliteitscontrole en burgerwetenschap, en hoe de rol van EPO's zou kunnen veranderen.

2. Citizen Science

De belangrijkste reden voor de vroege betrokkenheid van het RIVM bij burgerwetenschappelijke projecten was de snelle ontwikkelende markt voor goedkope sensoren, die ertoe leiden dat veel mensen de luchtkwaliteit in hun meten eigen achtertuin. Om te begrijpen hoe luchtkwaliteitssensoren werden gebruikt, was het noodzakelijk om contact te maken proactief met bestaande burgerwetenschappelijke gemeenschappen en om hun behoeften te begrijpen. RIVM heeft neemt daarom sinds 2012 deel aan burgerwetenschapsprojecten over luchtkwaliteit. De aard hiervan vroege projecten, de mate van betrokkenheid en samenwerkingspartners zijn in detail beschreven elders [10]. Ondanks de uiteenlopende aard van deze projecten, de belangrijkste inbreng van het RIVM bij deze burger wetenschapsprojecten draaiden rond enkele gemeenschappelijke thema's, voornamelijk rond de behoefte aan expert informatie over vragen als:

-
- Wat is luchtkwaliteit?

-
- Wat zijn de voorschriften en het beleid rond luchtkwaliteit?

-
- Hoe meet je de luchtkwaliteit? Welke sensoren zijn er op de markt?

-
- Wat is de kwaliteit van de (sensor) metingen?

-
- Hoe de sensormetingen in een bredere context te plaatsen?

Deze vragen overlappen met de kernactiviteiten van het RIVM: het bewaken van de luchtkwaliteit. Echter aan constructief samenwerken met burgerwetenschappers, burgerwetenschapsgroepen en lokale autoriteiten, expert informatie moest gemakkelijk toegankelijk worden gemaakt voor burgerwetenschappers. Daarom een kennis portal — momenteel beschikbaar als “www.samenmeten.nl” (samen meten) - werd gebouwd om te voorzien de expertinformatie gevraagd door burgerwetenschappers. Deze kennisportal werd gepresenteerd op een symposium in december 2016. Deelnemers aan dit symposium waren burgerwetenschappers, beleidsmakers van het ministerie van Infrastructuur en Waterbeheer, lokale autoriteiten, lokale gezondheid organisaties en specialisten van onderzoeksinstituten. Het primaire doel van het symposium was om informatie uitwisselen, zoeken naar manieren om verbinding te maken en samen te werken, en zoeken naar een weg vooruit burgerwetenschap en luchtkwaliteit. De aanwezigheid op dit eerste symposium overtrof de verwachtingen met meer dan 100 mensen aanwezig. Veel beleidsmakers en specialisten waren geïnteresseerd in burgerwetenschap, maar wist niet precies hoe verder te gaan. Daarom was de gemeenschap 'Samen meten' opgericht, met zijn kennisportaal "samenmeten.nl", als centrale hub voor burgerwetenschap en lucht kwaliteit in Nederland. Dit kennisportaal biedt informatie over luchtkwaliteit en sensoren, maar ook over burgerwetenschappelijke projecten, informatie die meestal door de projecten zelf wordt verstrekt. Bij de verzoek van de burgerwetenschapsgemeenschap “Samen meten”, is het RIVM doorgedaan met organiseren vergaderingen voor mensen om verbinding te maken en informatie uit te wisselen. Verschillende burgerwetenschappelijke bijeenkomsten waren georganiseerd met een groeiend publiek, waaronder een internationale bijeenkomst in 2017: “Status of Air Kwaliteitssensoren en hun gebruik in (officiële) monitoringstrategieën” [11].

Kortom, de burgerwetenschapsgemeenschap rond 'Samen meten' is gebouwd geleidelijk. Eerst door deel te nemen aan individuele CS-projecten, door van deze projecten te leren wat was nodig en door vooruit te gaan in kleine maar concrete stappen, telkens controleren of de stappen werden ondersteund door de gemeenschap.

Voorbeeld: succesvolle aanmoediging van het gebruik van burgersensoren

Het RIVM heeft het gebruik van goedkope sensoren in Nederland actief aangemoedigd. Eén succesvol activiteit was het meten van stof van vuurwerk tijdens oudejaarsavond. Dit gebeurde voor het eerst

op oudejaarsavond 2016/2017. In december 2016, aan het einde van het eerste symposium over burgerwetenschap en luchtkwaliteit werden 65 goedkope stofsensoren (Shinyei PPD42) met een loterij. Deelnemers kregen de opdracht om een weerbestendige behuizing te maken om de sensoren buiten te monteren om het gevoel van eigendom en verantwoordelijkheid van de deelnemer te vergroten. Elke sensor was al verbonden met een ESP8266 wifi-communicatiechip. De resultaten van de metingen waren automatisch verzonden naar het RIVM-gegevensportaal waar ze werden gevisualiseerd. Gecombineerd met 25 andere vergelijkbare sensorkits werden de effecten van vuurwerk op stofconcentraties gemeten met een totaal van 90 goedkope stofsensoren.

De metingen tijdens oudejaarsavond 2016/2017 trokken veel media-aandacht. Voor bijvoorbeeld, een krantenkop las: "Vuurwerk stof piek eindelijk gemeten". Hoewel onnauwkeurig, omdat vuurwerkstof jaarlijks door onze collega's zonder officiële referentie wordt gemeten metingen, deze kop is een geweldige illustratie van het potentieel van burgerwetenschappelijke metingen aandacht vragen voor problemen met de luchtkwaliteit. De metingen kwamen ook voor op sociale media, met name op Twitter waar "Samen meten" (actief als @samenmeten) berichten heeft ontvangen van verschillende burgerwetenschappers die gegevens aanbieden en de gegevens omarmen en resultaten sneller publiceren dan we zouden kunnen doen onszelf.

Zich bewust van de impact van het vuurwerkproject 2016/2017, verspreidde het RIVM het volgende jaar enkele 65 meer moderne stofsensoren (Nova SDS011) [12] bij verschillende Nederlandse burgerwetenschapsprojecten steden. Tegen die tijd begon een gemeenschap van burgers die hun eigen sensorkits bouwden, te groeien in de Nederland, waarvan sommige het Long Range (LoRa) -netwerk gebruikten voor het verzamelen van de gegevens. In in totaal hebben 150 sensoren de effecten van vuurwerk op de PM₁₀- en PM_{2.5}-concentraties gemeten tijdens

Nieuwjaar 2017/2018. Eindelijk, tijdens oudejaarsavond 2018/2019, een bloeiende gemeenschap met ongeveer 350 stofsensoren, meestal SDS011, toonden aan hoe stofconcentraties snel toenamen nadat het vuurwerk was begonnen.

De resultaten van deze drie meetcampagnes laten zien dat sensoren in stijgingen zijn geregistreerd PM_{2.5} en PM₁₀ concentraties van factoren 16-25 tussen de middag op 31 december en het begin van de Nieuwjaar. Na slechts enkele uren waren de concentraties weer op hetzelfde niveau als de dag ervoor (Figuur 2).

Alle gegevens werden onmiddellijk gedeeld met zowel deelnemers als het publiek. De gegevens zijn geanalyseerd door zowel professionals als anderen.

Zo hielp het Fireworks-project bij het bouwen, verenigen en vergroten van de burgerwetenschap over luchtkwaliteit gemeenschap in Nederland. Het inspireerde het RIVM verder om een 'samen meten' data te bouwen portal geopend voor alle burgerwetenschappelijke projecten om hun gegevens te uploaden, zie hoofdstuk 5.

Figuur 2. Gemiddelde PM_{2.5}-concentratie gemeten door ongeveer 300 stofsensoren tussen 31

December 2017, 12:00 (MET) en 1 januari 2018, 12:00 (MET).

3. Kalibratie van sensoren

Het technologische potentieel van sensoren gaat gepaard met nieuwe uitdagingen: de betrouwbaarheid van de meetresultaten zijn vaak onvoldoende, zelfs voor toepassingen waarbij een lagere nauwkeurigheid voldoende is, zoals in burgerwetenschappelijke projecten. Het RIVM heeft daarom verschillende onderzoeken gestart, niet alleen om de kwaliteit van enkele sensorgegevens, die worden beïnvloed door variërende meteorologie en mogelijk interfererende gassen, maar ook het verbeteren van hun meetprestaties (zie hieronder). Dit is niet puur wetenschappelijk oefening, maar vindt plaats in samenwerking met burgers, fabrikanten en autoriteiten. Uiteindelijk is dit

moet leiden tot een selectie van (sets van) sensoren die kunnen worden gebruikt bij officiële monitoring en modellering, evenals in andere toepassingen zoals burgerwetenschappelijke initiatieven.

3.1. Kalibratie van NO₂-sensoren.

Er zijn ongeveer vijftig sensorkits met NO₂-sensoren in Nederland actief (status juni 2019), waarvan er ongeveer dertig worden beheerd door het RIVM. De Alphasense B43F NO₂ sensor [13] is werkzaam in al deze. Voor zover wij weten, is deze sensor een van de weinige die verstandig begint te geven resultaten op omgevingsniveau NO₂, momenteel ruwweg 15-25 µg / m³ (jaarlijks gemiddelde), hoewel dit wel moet merkte op dat de prestaties van de sensor beter zijn bij hogere concentratieniveaus.

Analyse van de resultaten toont aan dat de NO₂-sensor met succes kan worden gekalibreerd vergelijking met referentiemetingen. Kalibratiealgoritmen zijn afgeleid voor individuele sensoren

met behulp van multi-lineaire regressiemodellen om rekening te houden met invloeden van meteorologie en ozon. Dit zijn realtime toegepast, met behulp van meteorologische gegevens en ozonkaarten per uur op basis van een combinatie van een model- en referentiemetingen. Momenteel blijkt een relatief eenvoudige formule goed te werken bereken NO_2 uit de uitgangsspanning van de sensor en verschillende omgevingsparameters:

$$\begin{aligned} & 2 \\ & 0 \ 1 \\ & 2 \\ & 3 \\ & 3 \\ & 4 \\ & 3 \\ & (1) \end{aligned}$$

Waarbij NO_2 NO_2 -concentratie verkregen uit de sensor (in microgram per kubieke meter);

V_{sensor} is de uitgangsspanning van de sensor (in Volt); O_3_{omgeving} is de ozonconcentratie in de omgeving bij locatie van de sensor (in microgram per kubieke meter); T_{omgeving} is de omgevingstemperatuur bij de locatie van de sensor in $^{\circ}\text{C}$.

De parameters $a_0 - a_4$ in vergelijking (1) worden verkregen door de sensoren te plaatsen met de officiële meetapparatuur, verzamelen van enkele weken gegevens en vervolgens aanpassen van de parameters afzonderlijk met behulp van de softwarepakketten R (versie 3.3.3) [14] en RStudio (versie 1.0.136) [15], met behulp van de multi-regressie routine lm . Het resultaat van een collocatie-experiment waarbij een set van acht werd vergeleken goedkope sensorsystemen meten NO_2 met een referentie-instrument gedurende meerdere weken weergegeven in Figuur 3. De resultaten van de sensoren, na het aanpassen van de kalibratieparameters, volgen het resultaat van de officiële metingen heel nauw. De correlatiecoëfficiënten tussen de afzonderlijke sensoren en de referentiemetingen in figuur 3 zijn allemaal hoger dan 0,95.

Figuur 3. Resultaat van een co-locatie-experiment waarbij een set van acht goedkope sensorsystemen werd vergeleken NO_2 meten met een referentie-instrument, tussen 3 maart 2019 (MET) en 28 maart 2019 (MET-DST). De labels van de curven in de figuur geven de resultaten van de officiële referentie aan metingen en resultaten van de sensoren.

Sommige sensoren drijven echter weg en de gevoeligheid zal in de loop van de tijd aanzienlijk veranderen.

Verskillende kalibratiestrategieën worden getest om deze afwijking en verandering in gevoeligheid te detecteren, en aan juist ervoor. De eenvoudigste methode is om elke sensor na een specifieke periode in het veld opnieuw te kalibreren 2-3 maanden, maar dit is in de praktijk minder haalbaar naarmate het aantal sensoren toeneemt. Iets meer complexe methode is gebaseerd op de veronderstelling dat er gedurende de nacht een beperkte variatie is in NO_2 concentratie. 'S Nachts kan de kalibratie van de sensoren worden geverifieerd door de resultaten van sensoren voor officiële metingen in de buurt [16]. Als er geen metingen in de buurt zijn, een interpolatie tussen metingen of modelinformatie kan worden gebruikt. Wanneer significant verschillen worden waargenomen, nachtelijke concentraties worden gebruikt om de parameters in de kalibratie aan te passen. De 'nachtelijke kalibratie' veronderstelt niet alleen beperkte lokale gradiënten in NO_2 gradiënten, maar veronderstelt ook dat de effecten van dagelijkse ozonvariëaties beperkt zijn. Hier zitten substantiële onzekerheden in veronderstellingen. Deze onzekerheden lijken echter minder groot dan er zullen zijn in het geval van de sensoren toegestaan te drijven zonder enige aanpassing. Tests uitgevoerd door zowel het RIVM als anderen geven aan dat de RMSE tussen officiële metingen en co-location sensoren na het toepassen van de 'nachtelijke kalibratie' is vergelijkbaar met die verkregen met kalibratie over de gehele periode [17].

Voorlopige resultaten van metingen verkregen met de Alphasense B43F geven aan dat kalibratie en gebruik van deze sensoren in de winter kan resulteren in zeer stabiele resultaten, maar in de zomer de resultaten zijn vrij slecht [17]. Mogelijk presteert de sensor niet goed bij hogere temperaturen, die kunnen worden veroorzaakt door tot nu toe onbekende interferenties en / of omdat de NO_2 -concentraties meestal waargenomen tijdens de zomer liggen dicht bij of onder de detectielimiet.

3.2. Kalibratie van $\text{PM}_{2.5}$ / PM_{10} -sensoren

Sensoren voor fijnstof hebben hun eigen unieke probleem: vochtigheid [18]. Stofsensoren doen dat meten niet echt de stofmassa, maar ze gebruiken een optisch systeem, meestal een laser, om de doorgang te detecteren

van deeltjes [12]. Gepatenteerde algoritmen van de fabrikanten schatten het aantal deeltjes

van de optische signalen en hun geschatte afmetingen. Deeltjesaantallen gecombineerd met schattingen voor de gemiddelde dichtheid geeft dan een schatting van de hoeveelheid massa in de lucht.

Wanneer de relatieve vochtigheid 100% nadert, bijvoorbeeld tijdens mistafleveringen in de ochtend, de sensoren interpreteren kleine druppels water als deeltjes, waardoor concentratiepieken ontstaan. Inwoner wetenschappers interpreteren deze pieken vaak als vervuiling door de ochtendspits. RIVM heeft een aanpak ontwikkeld om een realtime correctie uit te voeren voor meteorologische omstandigheden voor (groepen van) de Nova SDS011-sensor (zie hoofdstuk 4).

Correcties voor sensoren kunnen ook worden verkregen door de resultaten van sensoren te vergelijken met die van dichtbij officiële metingen over een lange periode en vervolgens empirische relaties bepalen. Dit is vergelijkbaar met de procedure die wordt gebruikt voor NO₂-sensoren, maar de relatie die wordt gebruikt voor de kalibratie is anders.

Als een spin-off van de burgerwetenschappelijke metingen van vuurwerk 2017/2018, een aanzienlijk aantal SDS011-sensoren waren actief in het centrum van Amsterdam. Gecombineerd met een aantal sensoren in Amsterdam die deelnamen aan het Lufdaten-project, waren er ongeveer 20 sensoren die gegevens verstrekten het grootste deel of heel 2018. Amsterdam heeft bovendien een relatief dicht netwerk van officiële metingen, onderhouden door de gemeentelijke gezondheidsdienst. Deze metingen worden uitgevoerd met behulp van de BAM1020 van Met-One [19]. Gebaseerd op de officiële uurlijkse metingen in Amsterdam gedurende heel 2018, is het dat? merkte op dat er gemiddeld slechts relatief kleine systematische verschillen tussen de meetlocaties (ongeveer 15% voor verkeers- en stedelijke achtergrondstations). Hoewel er zijn duidelijke verschillen tussen metingen per uur op verschillende locaties, ze neigen te annuleren ten opzichte van de gemiddelde concentratie in het centrum van Amsterdam. Daarom elk uur het gemiddelde van de 20 sensoren ongeacht hun locatie werd vergeleken met officiële metingen bij a centrale stedelijke achtergrondlocatie. De uurverhoudingen tussen de officiële metingen en de sensoren werden vervolgens uitgezet als een functie van de relatieve vochtigheid, gemeten in de buurt Luchthaven Schiphol. Een eenvoudige relatie van de uurcorrectiefactoren (CF) ontstond:

$$CF = a(100 - RH)$$

b

(2)

Met CF de (dimensieloze) correctiefactor en RH de relatieve vochtigheid (in%). Gebruik makend van (100-RH) in plaats van alleen RH maakt het gemakkelijker om een relatie aan te passen. De factor a en macht b worden gemonteerd van

de gegevens met behulp van de pakketten R en RStudio met de routine voor niet-lineair passende *nls*. Voor PM_{2.5} de gepaste parameters waren $a = 2,81 \pm 0,05$ en $b = -0,32 \pm 0,01$. De correctiefactoren per uur en de aanpassing aan de gegevens worden getoond in figuur 4.

Sfeer 2019, 10, 445

9 van 22

Figuur 4. Verhoudingen tussen de officiële PM_{2.5} metingen per uur in het Amsterdamse Vondelpark en de gemiddeld 20 (Nova SDS011) sensoren in het centrum van Amsterdam als functie van (100-RH), waar RH is de relatieve vochtigheid (in%).

Na het toepassen van de correctie voor relatieve vochtigheid op de gegevens, de correlatie tussen de het gemiddelde van de sensoren en de officiële metingen stijgt van 0,74 naar 0,80. Het resultaat erna correctie, wordt getoond in figuur 5. Bovendien werden de Amsterdamse gegevens gebruikt om een Random Forest (RF) machine-verdialgoritme. De door ons en anderen gevonden resultaten geven aan dat RF de kalibratie van stofsensoren verder kan verbeteren [20].

Sfeer 2019, 10, 445

10 van 22

Figuur 5. Correlatie tussen de officiële PM_{2.5} metingen per uur in het AmsterdamVondelpark (x-as) en het gemiddelde van 20 (Nova SDS011) sensoren in het centrum van Amsterdam (y-as). Allemaal concentraties in mg / m³.

We hebben vergelijkbare analyses uitgevoerd voor de PM₁₀-metingen van dezelfde sensoren. Op gemiddeld zijn de sensoren minder gevoelig voor grotere deeltjes. Een correctie, inclusief het aparte metingen van PM_{2.5} en PM₁₀, kunnen een redelijke correctie bieden voor de effecten van relatieve vochtigheid. Onderzoek naar de oorzaak is aan de gang.

Voor meer tests zijn ongeveer vijftien sensorkits langs wegen op het terrein van ingezet Universiteit Utrecht, dicht bij het RIVM en een partner in verschillende projecten. RIVM en Universiteit Utrecht beheer deze sensoren. De kits bevatten de Alphasense B43F NO₂ sensor en de Nova SDS011

PM_{2.5} / PM₁₀. De sensorkits van de Universiteit Utrecht dienden ook als testterrein om meer over te weten te komen de behuizing van verschillende sensoren in één set en, het allerbelangrijkste, over de beste manier van communiceren de gegevens naar de server. De resultaten van deze sensoren zijn openbaar en maken deel uit van een app ontwikkeld door studenten van de Universiteit van Utrecht.

3.3. Internationale samenwerking

Om de kwaliteit van goedkope sensoren te beoordelen en mogelijk te verbeteren, draagt het RIVM ook bij aan een aantal Europese initiatieven:

-

Met de steun van het LIFE-programma van de Europese Commissie, het VAQUUMS-project (Verschillende beoordelingen van luchtkwaliteit meetmethoden en hun beleidsondersteuning) onderzoekt welke sensoren een waardevolle aanvulling kunnen zijn op de referentiemetingen. Het vestigt de werkelijke prestaties van sensorsystemen die deeltjes, ozon en stikstof meten

Sfeer 2019, 10, 445

11 van 22

dioxide. Na een selectie van de meest veelbelovende, worden de sensorsystemen onderworpen strenge laboratorium- en veldtests die inzicht geven in hun betrouwbaarheid. Uiteindelijk is een instructiehandleiding voor correct sensorgebruik moet worden geschreven. Het project gaat ook een dialoog aan met lokale overheden, burgers, wetenschappers en industrie om kwaliteitseisen vast te stellen voor verschillende mogelijke gebruiksscenario's.

-

De CEN Technische Commissie 264 (Werkgroep 42: 'Sensoren') ontwikkelt een 'Technisch Specificatie'(TS) voor lucht- en PM-gebaseerde sensorsystemen. De concept-TS tot nu toe is gebaseerd op een combinatie van veldlocatiestudies en laboratoriumtests. Uiteindelijk zal het protocol worden ingeschakeld een classificatie van (geteste) sensorapparatuur in luchtkwaliteitsbewaking voor regelgeving en niet-regelgevende doeleinden (met een lichter experimenteel ontwerp).

-

Het RIVM heeft ook meegewerkt aan het AirSensEUR-project georganiseerd door het Gemeenschappelijk Centrum voor Onderzoek (JRC) [21,22]. AirSensEUR-dozen zijn geïnstalleerd op locaties met de nationale luchtkwaliteit Netwerk van het RIVM, genereert een grote dataset voor analyse.

De gecombineerde inspanningen van verschillende (nationale) instituten, universiteiten en organisaties ook aangezien veel burgerwetenschappers en -groepen belangrijk zijn om de algemene kwaliteitsparameters van te definiëren de vele sensoren die beschikbaar zijn en zullen worden. Samenwerking is belangrijk om bruikbare gegevens te verkrijgen op veel sensoren terwijl het vereiste werk nog steeds redelijk is. EPA's spelen mogelijk een integrerende rol hier omdat ze uniek zijn gepositioneerd tussen autoriteiten, wetenschappers en burgers.

4. Integratie van sensorgegevens met openbare en officiële informatie

Het gebruik van sensorgegevens maakt het, althans in theorie, mogelijk om de huidige luchtkwaliteitskaarten te verbeteren en voorspellingen van de luchtkwaliteit [23]. Als gevolg hiervan zal het publiek meer accurate informatie krijgen over de huidige en toekomstige luchtkwaliteit. In dit gedeelte beschrijven we de huidige informatie over de luchtkwaliteit verstrekt aan het Nederlandse publiek en onze inspanningen om de ruimtelijke en tijdelijke resolutie van lucht te verbeteren kwaliteitskaarten, bijvoorbeeld door sensorgegevens te assimileren.

4.1. Publieke informatie over luchtkwaliteit in Nederland

Voor milieu-informatie is het niet alleen belangrijk om metingen en berekeningen uit te voeren en beoordelingen, is het ook belangrijk ervoor te zorgen dat het publiek hier volledig en tijdig toegang toe heeft informatie. Het is bovendien belangrijk om het publiek te voorzien van de nodige hulpmiddelen en visualisaties om de informatie te begrijpen en erop te kunnen reageren. De Aarhus-conventie van 25 juni 1998 pakt dit aan; "Het verleent de publieke rechten en legt partijen en publiek op autoriteiten verplichtingen met betrekking tot toegang tot informatie en publieke participatie en toegang tot gerechtigheid"[24]. In Nederland wordt toegang tot realtime nauwkeurige informatie over luchtkwaliteit geboden op verschillende manieren. Alle metingen van het National Air Quality Monitoring Network (NAQMN) worden elk uur aangeboden op een website van RIVM en partners: www.luchtmeetnet.nl. In recente jaren is het nationale informatiesysteem uitgebreid met realtime kaarten van de luchtkwaliteit per uur, meer gedetailleerde prognoses en bovendien is alle informatie beschikbaar op apps. Voor de uurkaarten, de resultaten van officiële uurlijkse metingen voor NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} en O₃ worden gecombineerd met een set van model loopt om luchtkwaliteitskaarten te maken met een resolutie van 4 km × 4 km. Lokale variaties door emissies van wegverkeer worden afzonderlijk gemodelleerd. Het gecombineerde resultaat is een gedetailleerde luchtkwaliteitskaart met een resolutie van 125 m × 125 m. Voor het publiek om te kunnen reageren op luchtkwaliteit, zowel het heden situatie en die van de komende dagen moet beschikbaar zijn. Verschillende opties zijn beschikbaar voor

schat de luchtkwaliteit voor de komende dagen. De luchtkwaliteitsprognose voor Nederland is gebaseerd op berekeningen met het LOTOS-EUROS-model [25] van het Nederlandse met-office (KNMI).

Momenteel wordt alle informatie over luchtkwaliteit op de website www.luchtmeetnet.nl aangeboden als de officiële portal voor gegevens over luchtkwaliteit. Alle gegevens worden ook verspreid op een tak van de "Meten Samen" website: <https://samenmeten.rivm.nl/uurkaart/>. Hier kunnen de gegevens getoond op de website worden gecombineerd met andere soorten informatie, zoals realtime verkeersinformatie, satellietgegevens en resultaten van goedkope sensoren. De officiële NO₂ kaart voor de avond van 16 juni 2019 wordt weergegeven als een voorbeeld (figuur 6).

Sfeer 2019, 10, 445
12 van 22

Figuur 6. NO₂ kaart gepresenteerd voor het publiek op 16 juni 2019, tussen 20:00 en 21:00 MET-DST. Blauw komen overeen op NO₂ concentraties van 0 ug / m³ en rode gebieden corresponderen met 30 ug / m³. De kaart werd kort daarna gepubliceerd op <https://samenmeten.rivm.nl/uurkaart/> en op www.luchtmeetnet.nl 16 juni 2019, 21:00 MET-DST hoewel verschillende kleurenschema's worden gebruikt.

Voorbeeld: gebruik van RIVM-luchtkwaliteitskaarten door anderen

Alle gegevens die het RIVM voor openbare informatie heeft gemaakt, zijn per definitie beschikbaar voor andere partijen. Een van de grootste individuele gebruikers van deze luchtkwaliteitsgegevens is een niet-gouvernementele organisatie, "de Lung Foundation '(in het Nederlands: ' het Longfonds ')". Deze NGO sponsort onderzoek naar allerlei soorten long ziekten en probeert het publiek bewust te maken van de oorzaken van longziekten, zoals roken en lucht verontreiniging. Een recente activiteit van de Lung Foundation was het ontwikkelen van een app en website waar de publiek kan de geschatte realtime luchtkwaliteit op elke locatie in Nederland controleren [26]. Door het verstrekken van een live kaart, kan elke persoon, maar met name mensen met ademhalings- of longaandoeningen hun dagelijkse activiteit dienovereenkomstig aanpassen. Binnen enkele maanden werd de app meer dan een miljoen gebruikt tijden.

Sfeer 2019, 10, 445
13 van 22

4.2. Luchtkwaliteitskaarten verbeteren met goedkope sensorsystemen

Een van de volgende stappen om de informatie voor het publiek te verbeteren, is het toenemende aantal te combineren van goedkope PM₁₀ / PM_{2.5}-sensoren (ongeveer 500 in Nederland in juni 2019) met officieel metingen en de uurkaarten van luchtkwaliteit. Om dit te doen, moeten de resultaten van de sensoren eerst worden gecorrigeerd voor storende effecten, waarbij relatieve vochtigheid de belangrijkste is. Zoals besproken in In paragraaf 3.2 is vastgesteld dat optische deeltjestellers, dat wil zeggen alle bekende goedkope "stofsensoren", rapporteert onrealistisch hoge PM_{2.5}- en PM₁₀-concentraties wanneer de relatieve luchtvochtigheid in de omgeving benadert 100% [27]. Voor bekende sets sensoren, zoals die in Amsterdam, een speciale kalibratie over een langere periode is mogelijk. In veel gevallen verschijnen er echter sensoren op de gegevens portal zonder enige voorkennis over de kwaliteit en / of gevoeligheid voor vochtigheid. Daarom een directe aanpak is noodzakelijk. Twee mechanismen voor directe kalibratie van PM-sensoren zijn: momenteel getest en geïmplementeerd bij RIVM: 1. Kalibratie met behulp van een afzonderlijk bepaalde kalibratie curve gebaseerd op omgevingsvochtigheid en 2. Kalibratie met behulp van verhoudingen tussen de resultaten van de officiële metingen en groepen sensoren in de buurt.

Voor methode 1 moet een kalibratiecurve worden bepaald. In sommige gevallen kunnen sensoren worden gekalibreerd gedurende een substantiële periode in de buurt van of op een officieel meetstation, zoals besproken in paragraaf 3. algemeen kan een relatie voor kalibratie worden geschat door de gemiddelde resultaten van een groep te vergelijken sensoren voor resultaten van co-located, of heel dichtbij, officiële metingen. Deze kalibratie bepaald op een locatie wordt verondersteld toepasbaar te zijn op andere sensoren (van hetzelfde type) op vergelijkbare locaties locaties. Dit lijkt een redelijke veronderstelling, aangezien groepen van op elkaar geplaatste SDS011-sensoren behoorlijk tonen soortgelijk gedrag in de praktijk, en aangezien relatieve vochtigheid de belangrijkste factor is voor de kalibratie. Er zijn natuurlijk variaties in de reacties van individuele sensoren, wat leidt tot onzekerheden in de veronderstelde kalibratie. Gegeven een parametering van de kalibratie van de sensoren, een kaart van bekend relatieve vochtigheid kan worden gebruikt om een kaart met correcties voor de sensoren samen te stellen. De Nederlanders met-office beheert een netwerk van ongeveer 30 meetstations en biedt realtime meteorologische gegevens die worden gebruikt bij de analyse en kalibratie van de sensoren. Veel sensorkits zijn uitgerust met hun eigen temperatuur- en vochtigheidssensor die in principe als input kan worden gebruikt voor de kalibratiecurve. Helaas, deze goedkope sensoren breken vaak en zijn daarom geen solide basis voor kalibratie. Met behulp van de gegevens van het Nederlandse met-office kan een onzekerheid in de kalibratie omdat de omstandigheden zelden zeer dicht bij de locatie van de worden gemeten

sensors. Aan de andere kant verandert de relatieve vochtigheid langzaam binnen een gebied en de nauwkeurigheid en de stabiliteit van de officiële meteorologische gegevens is zeer goed.

Methode 2 is vergelijkbaar, maar vertrouwt niet op meteorologische gegevens. In verschillende testen met groepen van sensoren in Nederlandse steden, werd vastgesteld dat de verschillen tussen de resultaten van sensoren binnen deze steden groepen zijn vrij klein. Hoewel er in stedelijke gebieden veel bronnen van fijn stof zijn, is het lokale impact is meestal vrij beperkt, in Nederland. Gemiddeld draagt wegverkeer slechts 1–2 $\mu\text{g} / \text{m}^3$ aan de PM_{10} concentratie, en nog minder $\text{PM}_{2.5}$. Houtverbranding is misschien een andere lokale bron van PM-vervuiling. Desalniettemin, afhankelijk van de meteorologische omstandigheden, de pluimen als gevolg van het verbranden van hout zal meanderen. Dit leidt niet tot een constant hoog lokaal bijdragen, tenzij metingen zeer dicht bij schoorstenen of wanneer meerdere schoorstenen worden genomen omring de locatie. Een optie is daarom om het gemiddelde van de sensoren die zich binnen bevinden te vergelijken enkele kilometers van een officieel meetstation naar het resultaat van deze officiële meting. De ratio van sensoren versus officiële metingen kunnen worden gebruikt als een lokale correctiefactor voor alle vergelijkbare sensoren in de omgeving. De resultaten van een aantal van deze ratio's kunnen in heel Nederland worden geïnterpoleerd maak een correctieveld voor de sensoren. Tests zijn aan de gang om de onzekerheden van de verschillende opties voor een landelijke kalibratie van stofsensoren.

Voorbeeld: hoge PM-concentraties volgen na paasvuren

Een andere activiteit waarbij we fijnkorrelige sensorgegevens hebben gebruikt om realtime luchtkwaliteitskaarten te verbeteren, was het stof van vreugdevuren aan het volgen tijdens Pasen 2019. De traditie van het hebben van grote vreugdevuren is erg gebruikelijk in verschillende landen in Europa. Afhankelijk van de meteorologische omstandigheden, de effecten van deze branden kunnen worden waargenomen in een groot gebied met de wind mee. Vooral de geur van de branden wordt ver waargenomen

Sfeer 2019, 10, 445
14 van 22

weg van het vuur. In 2019 veroorzaakte een lange periode van ontwerp voorafgaand aan Pasen grote zorgen over de vuren. Als gevolg hiervan werden de meeste vreugdevuren in Nederland geannuleerd. In Duitsland echter de situatie was anders en veel vuren werden aangestoken, vooral op de avond voor Pasen. Zoals de wind kwam op dat moment uit het oosten, de pluimen van de vuren trokken langzaam naar Nederland. De stof in de pluimen bestond voornamelijk uit $\text{PM}_{2.5}$. Vanwege de beschikbaarheid van ongeveer 45 officiële $\text{PM}_{10} / \text{PM}_{2.5}$ meetstations, in combinatie met 350 stofsensoren, meestal SDS011, was RIVM in staat om een gedetailleerde kaart te maken van de stofwolk die zich langs de oostgrens en vervolgens heeft opgebouwd langzaam verplaatst over het land, naar het westen (figuur 7). Concentratiekaarten werden gegenereerd voor elke uur van het paasweekend en gecombineerd in een videoclip die vervolgens werd gedeeld met de publiek [28].

Sfeer 2019, 10, 445
15 van 22

Figuur 7. Kaarten van de stofwolk die zich tijdens Pasen 2019 boven Nederland verplaatst, met behulp van informatie van 45 officiële meetstations en ongeveer 350 stofsensoren. Het stof in de pluimen bestond voornamelijk van $\text{PM}_{2.5}$. Blauwe kleuren geven $0 \mu\text{g} / \text{m}^3$, rood geeft $130 \mu\text{g} / \text{m}^3$. Van linksboven naar rechtsonder, de kaarten zijn voor 20 april, 23:00 tot 21 april, 14:00, in stappen van 3 uur.

Sfeer 2019, 10, 445
16 van 22

5. Gegevensportaal

Een belangrijk verzoek van burgerwetenschappers is de mogelijkheid om hun eigen sensorgegevens te zien, en om hun eigen metingen te vergelijken met andere sensoren of officiële referentiemetingen. daarom Het RIVM heeft een dataportaal ontwikkeld waar sensorgegevens publiekelijk beschikbaar zijn: samenmeten.rivm.nl. Naar onze kennis, dit dataportaal is het meest uitgebreide en continu groeiende sensordataset in Nederland, momenteel bestaande uit meer dan 500 sensoren.

Iedereen wordt aangemoedigd om sensorgegevens van de luchtkwaliteit te delen met het RIVM. Het RIVM heeft er echter een paar vereisten voor delen om de gegevenskwaliteit te verbeteren, waaronder:

-

Type sensor en modificaties (bijvoorbeeld "luchtdroging") moeten bekend zijn. Dit is belangrijk om de kwaliteit van de gegevens te beoordelen en om te beslissen of de sensorgegevens worden opgenomen in

RIVM's kalibratie-algoritmen.

•

Alle algoritmen die worden gebruikt om de gegevens van sensoren te kalibreren en achteraf te verwerken, moeten bekend zijn; Nee "Zwarte dozen" zijn toegestaan. Het gebruik van eigen algoritmen in sensoren is onvermijdelijk. Echter, verdere verwerking van de gegevens door de producent of door de gebruiker moet worden gemeld en gedocumenteerd.

•

De eigenaar van de sensor moet zich ervan bewust zijn dat de gegevens openbaar beschikbaar zullen zijn en dat zijn of haar locatie wordt gedeeld op een kaart. De locatie van de sensoren wordt willekeurig met maximaal verschoven 50 meter telkens wanneer ze op een kaart worden getoond. Dit maakt het moeilijker voor casual gebruikers van de website om de exacte locatie van de sensor vast te stellen en biedt dus een bepaald niveau van privacy voor mensen die hun sensorgegevens delen.

5.1. Gegevensverzameling en opslag

RIVM verzamelt sensorgegevens van verschillende eigen projecten, met behulp van meerdere IoT-technieken, zoals wifi, LoRa en Narrowband (NB-IoT) om deze gegevens te verzamelen. Ervaringen hiermee technieken zijn gevarieerd. Wi-Fi wordt al sinds het begin gebruikt door het RIVM om de sensorgegevens te uploaden dagen. Het belangrijkste nadeel van Wi-Fi-connectiviteit is het aantal benodigde bewerkingen van de gebruiker. Technisch bekwame gebruikers hebben over het algemeen geen probleem om de sensor met zichzelf te verbinden Wi-Fi-netwerk, maar het blijkt moeilijk voor anderen. Bovendien is het Wi-Fi-signaal gevoeliger voor storingen vooral wanneer gebruikt met mobiele netwerken (3 / 4G), waardoor gegevens verknald raken of gegevens ontbreken. daarom andere sensoren zijn uitgerust met LoRa, geleverd door The Things Network (TTN) [29]. LoRa vereist een eenvoudiger configuratie dan Wi-Fi en levert een robuustere gegevensstroom. Gegevens worden gelezen via de Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), een eenvoudig protocol om de gegevens uit te halen TTN. Het belangrijkste nadeel van LoRa is het gebrek aan dekking op het platteland. Bijgevolg is het niet mogelijk om LoRa te gebruiken voor monitoring in landelijke gebieden, behalve wanneer eigen gateways worden ingezet niet praktisch voor het RIVM. NB-IoT wordt steeds vaker gebruikt als communicatietechniek om te verzenden sensorgegevens. NB-IoT gebruikt de bestaande commerciële mobiele netwerken om apparaten en servers te verbinden. EEN groot voordeel is dat het landelijke dekking heeft, althans in Nederland. Alle gegevens landen in een InfluxDB, een relatief eenvoudige database die is geoptimaliseerd voor tijdreeksen en snelle toegang tot de gegevens. Sommige sensorgegevens worden verzameld uit API's van andere projecten met behulp van Python. Bijvoorbeeld Lufdaten heeft enkele duizenden sensoren operationeel in Europa en biedt de gegevens aan via een open API. Om de vijf minuten wordt een API-call uitgevoerd om gegevens te verzamelen van apparaten in Nederland, België en Duitsland.

Als gevolg hiervan bevat InfluxDB alle onbewerkte gegevensrecords uit verschillende bronnen. InfluxDB is echter beschouwd als een pass-through-database, en alle onbewerkte gegevens worden bijna realtime ingevoegd in een PostgresDB. Deze PostgresDB bevindt zich binnen de RIVM-firewall en wordt beschouwd als de primaire database. In PostgresDB worden de onbewerkte gegevens geaccumuleerd in uurgemiddelden. Deze uurgemiddelden zijn, soms na kalibratie, gevisualiseerd op RIVM-dataportaal.

5.2. Visualisatie en downloads

RIVM-dataportaal toont sensoren als gekleurde stippen op de kaart, met kleuren op basis van de meeste recente sensorwaarde per uur (Afbeelding 8). De gebruikte kleurschaal is gebaseerd op de gebruikte kleurschalen in

andere Nederlandse luchtkwaliteitskaarten, zoals die bij de Atlas of the Living Environment [30]. Sensorgegevens worden getoond voor verschillende luchtkwaliteitscomponenten: PM₁₀, PM_{2.5} en NO₂. Naast sensorgegevens, maandelijkse gegevens van passieve NO₂-samplers worden ook gevisualiseerd. Indien beschikbaar, weergegevens zoals temperatuur en luchtdruk, kunnen ook worden geselecteerd.

Figuur 8. Weergave van het dataportaal "Samen meten" (samenmeten.rivm.nl), voorbeeld uit 26

Juni, 2019, toen het cijfer op het dataportaal werd getoond. De sensoren die op de portal worden weergegeven, worden weergegeven hogere PM_{2.5}-concentratie in het zuidoosten van het land. De officiële metingen toonden de zelfde patroon.

Hierdoor biedt de startpagina van het RIVM-dataportaal een snel overzicht van de huidige situatie kwaliteit in Nederland, gemeten door alle sensoren. Het is mogelijk om in te zoomen op gemeentelijk of individueel sensorniveau. Wanneer tien of minder sensoren zichtbaar zijn, verschijnt er een dashboard met een lijn grafiek voor alle sensoren, waardoor het mogelijk is om snel een indruk te krijgen van de trends van deze sensoren (Figuur 9). Bovendien is het mogelijk om individuele sensorgegevens te onderzoeken. Standaard is een tijdreeksplot weergegeven, waar sensorgegevens kunnen worden vergeleken met het dichtstbijzijnde officiële referentiestation voor luchtkwaliteit. Tijd

Figuur 9. Weergave van het dataportaal "Samen meten" (samenmeten.rivm.nl) na inzoomen op bijna straatniveau, bijvoorbeeld vanaf 26 juni 2019, toen het cijfer op het dataportaal werd getoond. De individuele resultaten van alle sensoren in de weergave (indien minder dan 10) worden gepresenteerd. De acht sensoren getoond in het linkerpaneel tonen alle sterk toenemende PM_{2.5}-concentraties gedurende de laatste 12 uur. Alle sensorgegevens kunnen worden gedownload. Momenteel is een applicatie-programmeerinterface (API) wordt ontwikkeld met behulp van de OGC SensorThings API [31], waardoor het voor derden gemakkelijk is sensorgegevens in bulk downloaden. Voor mensen die niet bekend zijn met API's, een nieuwe downloadfunctie zal worden ontwikkeld.

6. Discussie

De ontwikkeling van een nationaal dataplatform voor sensordata biedt kansen voor gegevens uit nationale of wereldwijde bronnen integreren, wat kan leiden tot de ontwikkeling van gegevensproducten en toepassingen die gebruikers kunnen helpen de luchtkwaliteit op buurtschaal te begrijpen [32]. Hier hebben we presenteerde RIVM's aanpak voor het ontwikkelen van een dergelijk dataplatform en presenteerde een aantal use cases voorbeelden. Historisch gezien zijn gegevens over de luchtkwaliteit verzameld door verschillende gemeenschappen, onderzoekers en academici, maar vaak alleen in het kader van individuele programma's. Een gecentraliseerd gegevensplatform is daarom een belangrijke wens van de gemeenschap voor luchtkwaliteit, omdat deze een efficiëntere inzameling mogelijk maakt en visualisatie van sensorgegevens en zorgt voor krachtigere data-analyse [32]. Bijvoorbeeld, kalibratie-algoritmen kunnen op grote schaal worden getest, in reële situaties. Bovendien door het verstrekken van een dataplatform, hoeven individuen geen problemen op te lossen zoals dataverbinding, data acquisitie en visualisatie van sensorgegevens, maar kan zich concentreren op de resultaten van hun metingen. In een recente workshop over goedkope luchtkwaliteitssensoren werd besproken dat de luchtkwaliteit community moet af van het kwalificeren van sensorgegevens als goed of slecht, omdat dit in orde is de eindgebruikers om te bepalen of de gegevenskwaliteit goed genoeg is voor hun specifieke gebruik [32]. Een belangrijke voorwaarde hiervoor is het opnemen van metadata zodat de kwaliteit van de sensorgegevens dat kan worden gekenmerkt. Dit is een belangrijke volgende stap voor het RIVM-dataplatform zoals metadata is momenteel niet automatisch opgenomen. Voor bekende projecten, zoals die van Lufdaten en die van het RIVM projecten, is de instelling van de sensor bekend, maar individuele sensorwijzigingen kunnen voorkomen. Deze moeten worden opgenomen in de metagegevens, maar individuele gebruikers leveren meestal geen metagegevens. Een gestandaardiseerde methode voor het verzamelen van metadata zal dus belangrijk zijn. Bijgevolg kalibratie algoritmen ontwikkeld door RIVM maken alleen gebruik van bekende sensoren, zoals de SDS011 en B43F en over een paar maanden zal de Sensirion SPS30 ook worden opgenomen. Dit alles houdt in dat het onderhoud

en kwaliteitsborging van het luchtkwaliteitscontrolesysteem zal fundamentele veranderingen ondergaan indien sensoren worden onderdeel van het reguliere monitoringsysteem. Hoewel de kwaliteit van sensorgegevens voor bepaalde toepassingen voldoende kan zijn, blijft deze behouden belangrijk om het gebruik van goedkope sensoren in perspectief te plaatsen: de huidige kwaliteit van goedkope sensoren staat het gebruik van de gegevens voor juridische doeleinden of testen aan de luchtkwaliteitsnormen niet toe. Bovendien, het analyseren van individuele sensorgegevens is mogelijk niet nuttig vanwege de variabiliteit in sensor kwaliteit. Op tegelijkertijd, zoals de voorbeelden in ons artikel laten zien, het gebruik van goedkope sensoren, met name van PM-sensoren kunnen waarde toevoegen aan het reguliere monitoringsysteem en aan individuele gebruikers 'ervaring, en kan in het algemeen aandacht schenken aan luchtkwaliteitsproblemen, consistent met typisch voorbeelden uit de literatuur [33]. Daarom is het belangrijk om de juiste balans te vinden tussen het gebruik van sensoren bevorderen en de waarde van (individuele) sensoren in vraag stellen. Dit blijft een voortdurende uitdaging, vooral met de opkomst van commerciële bedrijven die claimen dat sensorgegevens dat kunnen zijn gebruikt voor beleidsbeslissing [34]. Bovendien is de betrokkenheid van honderden individuen en tientallen gemeenteraden, elk met hun eigen ideeën over het gebruik van luchtkwaliteitssensoren, halen het praktisch onmogelijk om dit aan individuen te benadrukken. Het opzetten van een kennisportaal waar actuele informatie over luchtkwaliteitssensoren wordt gedeeld, helpt discussies over de kwaliteit van sensorgegevens en om verwachtingen te verduidelijken bij de start van projecten. Bovendien breiden we onze uit aanwezigheid op sociale media maakt het gemakkelijker om deel te nemen aan directe discussies met niet-professionals. De betrokkenheid van burgers vereist een verschuiving in aanpak van luchtkwaliteitsexperts van targeting alleen andere professionals in het veld om ook niet-professionals aan te spreken. Vaak,

burgers zijn geïnteresseerd in de gevolgen van luchtvervuiling voor hun eigen gezondheid en vragen om effectief manieren om luchtvervuiling in hun buurt aan te pakken; kwesties die traditioneel enigszins buiten de lijn liggen reikwijdte van experts op het gebied van milieugegevens. Bovendien voldoen huidige sensoren niet aan het doel kwaliteitsvereisten, het koppelen van sensorgegevens aan gezondheidsresultaten is lastig. Dit houdt in dat dit misschien niet zo is mogelijk om alle zorgen van burgers aan te pakken, hoewel het nuttig kan zijn om het bewustzijn hierover te vergroten de potentiële gezondheidseffecten van luchtvervuiling. Daarom een reflexieve benadering van luchtkwaliteitsexperts is vereist, wanneer zorgen van burgers serieus worden genomen, maar beperkingen van de huidige technologieën worden duidelijk uitgelegd.

Ten slotte is de betrokkenheid van EPA's bij sensoren en luchtkwaliteit belangrijk om werkwijzen te standaardiseren, zowel nationaal als internationaal. Het RIVM is daarom actief betrokken bij bijvoorbeeld de CEN Technische Commissie. Bovendien moet de betrokkenheid van EPO's uit veel landen worden gewaarborgd dat de metingen van luchtkwaliteit op een transparante manier worden uitgevoerd en dat open gegevens dat zijn gewaarborgd. Dit is vooral belangrijk omdat het concept van een 'slimme stad' voor een breed publiek interessant is bereik van commerciële partijen, en verschillende bedrijven, zoals Google, beginnen nu lucht te meten kwaliteit als een dienst aan overheden [35]. Tegelijkertijd laat het RIVM-dataplatform derden toe om geld te verdienen met de gegevens. Gegevens kunnen bijvoorbeeld worden gebruikt voor apps zoals een routeplanner op basis van de laagste blootstelling aan luchtvervuiling, dashboards over de lokale omgeving et cetera. Een belangrijke hier gaat het om de rechtvaardigheid van het milieu [32], omdat dit misschien niet ten goede komt aan de eigenaars van gegevens bijgedragen gegevens aan het gegevensplatform. Deze ontwikkelingen kunnen echter ook de wetenschap bevorderen en praktische, real-world toepassing van luchtkwaliteitsgegevens. Het is echter belangrijk dat gegevens over de luchtkwaliteit, maar ook de daaropvolgende tools om de gegevens te analyseren, zijn beschikbaar voor lokale gemeenschappen die mogelijk ontbreken de vaardigheden of middelen om deze tools zelf te ontwikkelen. Daarom zal een actieve rol van EPA's spelen ervoor zorgen dat gegevens over de leefomgeving vrij beschikbaar blijven voor burgers.

voorzicht

Tot nu toe hebben we nagedacht over de ervaringen die voortvloeien uit ons "Innovatieprogramma voor Milieu Controle". De volgende stappen binnen het programma omvatten de assimilatie van andere soorten luchtkwaliteitsinformatie, zoals satellietgegevens, in de luchtkwaliteitskaarten per uur (figuur 1). Een andere belangrijke stap is de overgang naar een betere karakterisering van de luchtvervuiling van individuen blootstelling gedurende de dag. Tegenwoordig koppelen epidemiologische onderzoeken vaak gezondheidsresultaten aan lucht vervuiling op het huisadres, terwijl een aanzienlijke hoeveelheid tijd elders wordt doorgebracht. Sensoren laten een toe betere kwantificering van de daadwerkelijke blootstelling aan luchtvervuiling [36]. Momenteel is het RIVM betrokken bij een project

waar Sensorion SPS30-stofsensoren worden gemonteerd op 500 fietsen, allemaal binnen ongeveer 25 fietsen km van de stad Utrecht. Kalibratie en validatie van de output zal een grote uitdaging zijn, maar als succesvol, zal een betere schatting van typische luchtvervuiling tijdens cyclus pendelen worden verkregen. Sensoren worden ook ingezet rond de intensieve veehouderij, waar een mogelijk verband tussen licht werkelijke PM-concentraties en gezondheidsuitkomsten op korte termijn zullen worden onderzocht. Deze projecten vertegenwoordigen stappen in de richting van het algemene doel om het exposoom, dwz alle omgevingen, beter te kwantificeren blootstellingen van een individu in zijn leven, en hoe die blootstellingen verband houden met gezondheid. In de toekomst kan het systeem met sensoren dat we bouwen ook verder worden uitgebreid omvatten de belichting thuis of in andere binnenomgevingen. Dit vereist echter manieren om omgaan met privacykwesties, evenals het gebruik van persoonlijke metingen, bijvoorbeeld met activity trackers en de net zoals. Ook zou toevoeging van andere omgevingsparameters (bijvoorbeeld geluid, straling) een mogelijkheid zijn.

7. Conclusies

De rol van EPO's zal de komende jaren aanzienlijk veranderen door de opkomst van burgers wetenschap en steeds beter presterende goedkope sensortechnologie. Zoals uit ons artikel blijkt, a kennisportaal en een gecentraliseerd dataplatform zijn belangrijke hulpmiddelen om in contact te komen met burgers en hun respectieve behoeften, en om het delen van luchtkwaliteitsgegevens verkregen door goedkope sensoren te vergemakkelijken. Het publiek voorzien van de informatie die nodig is om betere metingen uit te voeren is wederzijds gunstig voor de burgers en EPA's. Andere EPA's en vergelijkbare organisaties worden aanbevolen hun eigen versies van dit soort portals maken of vergelijkbare services aanbieden met andere tools en oplossingen.

Het is belangrijk dat de gegevens in de portal 'open' zijn en het gegevensplatform en de daaropvolgende hulpmiddelen zijn voor iedereen toegankelijk en dat het voor derden gemakkelijk is om hun gegevens te up- en downloaden. Voor de meerderheid van gebruikers van het dataportaal, visualisatie van sensorgegevens is het meest nuttig wanneer deze actueel is

luchtkwaliteit en geeft aan of het niveau van luchtvervuiling 'hoog' of 'laag' is.

Het is belangrijk om een soort kalibratiestandaard of -methoden te bieden om de algehele kwaliteit te verhogen kwaliteit van de sensorgegevens in de portal. Een gecentraliseerd gegevensplatform zorgt voor betere gegevensanalyse en het opstellen van gedeelde kalibratie-algoritmen. Een belangrijke voorwaarde hiervoor is het opname van voldoende metadata zodat de sensor kwaliteit kan worden gekarakteriseerd. Verder onderzoek is nodig om robuuste kalibratiemethoden vast te stellen en de behoeften van burgerwetenschappers beter te begrijpen het huidige gegevensplatform verbeteren.

Veel van de gebruikers van de Nederlandse platforms zoeken naar informatie over de relatie tussen hun gezondheid en de luchtvervuiling die ze meten. Gezien de huidige kwaliteit van sensormetingen, het leggen van expliciete verbanden tussen sensorresultaten en gezondheidseffecten is lastig. Het is heel belangrijk om communiqueer de onzekerheden en beperkingen van sensoren duidelijk. Onze ervaring is dat gebruikers van sensoren gegevens begrijpen de beperkingen van hun meetresultaten.

Ten slotte is het voor nationale EPO's en soortgelijke organisaties een belangrijke taak om een onafhankelijke en onpartijdige rechter van bevindingen over de luchtkwaliteit, ongeacht of deze zijn verkregen door officiële metingen of door nieuwe sensortechnologie. Door dit te doen, kunnen de EPA's verdienen en behouden het vertrouwen van alle betrokken partijen, burgers en autoriteiten.

Bijdragen auteurs : alle auteurs maken deel uit van het team 'Samen meten' / 'Samen Meten' bij het RIVM, en bijgedragen aan (delen van) het in dit artikel beschreven werk. Conceptualisatie, JW; Schrijven - origineel ontwerp, JW en HdR; Schrijven - beoordelen en bewerken, JW, HdR, CB, DD, EW, HV, JV, LG, MV, PZ, SvR en ET Alle auteurs hebben de definitieve versie goedgekeurd.

Financiering: het "Innovatieprogramma voor milieumonitoring" wordt gefinancierd door het Nederlandse ministerie van Infrastructuur en waterbeheer.

Erkenningen: We erkennen alle burgerwetenschappers die hun sensorgegevens hebben bijgedragen en kennis voor ons. In het bijzonder willen we Teus Hagen en Dieter Pientka erkennen. Verder wij wil graag onze dank uitspreken aan vertegenwoordigers van verschillende Nederlandse steden die ermee zijn gaan experimenteren sensoren voor luchtkwaliteit en voor de (inter) nationale organisaties die met ons samenwerken aan dit onderwerp. Ten slotte, wij dankbaar erkenning en steun van het Nederlandse ministerie van Infrastructuur en Water Beheer.

Belangenconflicten: de auteurs verklaren geen belangenconflicten.

Referenties

1.

EER. *Luchtkwaliteit in EUROPA — 2015 rapport* ; Bureau voor publicaties van de Europese Unie: Luxemburg, Luxemburg, 2015; doi: 10,2800 / 62459.

2.

Richtlijn van de Commissie. 96/62 / EG van 27 september 1996 inzake beoordeling en beheer van de luchtkwaliteit ; Bureau voor publicaties van de Europese Unie: Brussel, België, 2008.

3.

Europese Commissie. Richtlijn 2008/50 / EG van het Europees Parlement en de Raad van 21 mei 2008 over de luchtkwaliteit en schonere lucht voor Europa. *Uit. J. Eur. Union* **2008**, 152, 1-44.

4.

Mead, M. ; Popoola, O. ; Stewart, G. ; Landshoff, P. ; Calleja, M. ; Hayes, M. ; Baldovi, J. ; McLeod, M. ; Hodgson, T. ; Dicks, J. ; et al. Het gebruik van elektrochemische sensoren voor het bewaken van de luchtkwaliteit in steden tegen lage kosten, netwerken met een hoge dichtheid. *Atmos. Environ.* **2013** , 70 , 186–203.

5.

Moltchanov, S. ; Levy, I. ; Etzion, Y. ; Lerner, U. ; Broday, DM; Fishbain, B. Over de haalbaarheid van meten stedelijke luchtvervuiling door draadloos gedistribueerde sensornetwerken. *Sci. Totaal omgevingen.* **2015** , 502 , 537-547.

6.

Snyder, EG; Watkins, TH; Solomon, PA; Thoma, ED; Williams, RW; Hagler, GSW; Shelow, D. ; Hindin, DA; Kilaru, VJ; Preuss, PW Het veranderende paradigma van monitoring van luchtvervuiling. *Environ. Sci. Technol.* **2013** , 47 , 11369–11377.

7.

Jiang, Q. ; Kresin, F. ; Bregt, AK; Kooistra, L. ; Pareschi, E. ; Van Putten, E. ; Volten, H. ; Wesseling, J. Citizen Sensing voor verbeterde stedelijke omgevingsmonitoring. *J. Sens.* **2016** , 2016 , 1-9.

8.

Lufdaten. Online beschikbaar: www.lufdaten.info (toegankelijk op 17 juni 2019).

9.

Castell, N. ; Maat, FR; Schneider, P. ; Vögt, M. ; Lerner, U. ; Fishbain, B. ; Broday, D. ; Bartonova, A. Can commerciële goedkope sensorplatforms dragen bij aan monitoring van luchtkwaliteit en schattingen van de blootstelling? *Environ. Int.* **2017** , 99 , 293-302.

10. Volten, H. ; Devilee, J. ; Apituley, A. ; Carton, L. ; Grothe, G. ; Keller, C. ; Kresin, F. ; Land-Zandstra, A. ; Noordijk, E. ; van Putten, E. *Hoofdstuk 21 in Verbetering van nationale milieumonitoring door lokale burgers Wetenschap* ; UCL Press: Londen, VK, 2018.

11. Samen Meten. Status van luchtkwaliteitssensoren en hun gebruik in (officiële) monitoringstrategieën. Beschikbaar online: <https://www.samenmetenaanluchtkwaliteit.nl/sensor-meeting-februari-13th-2017> (toegankelijk op 17

Juni 2019).

12. Nova.

Laser

PM2.5

Sensor - SDS011.

Beschikbaar

online:

<http://inovafitness.com/en/a/chanpinzhongxin/95.html> (bezoekt op 18 juni 2019).

13. Alphasense. Stikstofdioxide — Alphasense 4 — elektrodegassensoren werken met beproefde brandstof technologie. Online beschikbaar: <http://www.alphasense.com/index.php/products/nitrogen-dioxide-2/> (bezoekt op 18 juni 2019).

14. R Ontwikkeling kernteam. *R: Een taal en omgeving voor statistisch computergebruik*; R Foundation voor Statistische gegevensverwerking: Wenen, Oostenrijk, 2011.

15. Team RStudio. *RStudio: Integrated Development for R*; RStudio, Inc.: Boston, MA, VS, 2015; p. 14.

16. Tsujita, W.; Yoshino, A.; Ishida, H.; Moriizumi, T. Gas sensor netwerk voor luchtvervuiling monitoring. *Sens. Actuators B Chem.* **2005**, *110*, 304–311.

17. Elshout van den, S.; Willers, S.; Gaag van der, E. Duurtest NO₂-sensor (NO₂-sensor testen). *Lucht* **2019**, *2*, 15–19.

18. Jayaratne, R.; Liu, X.; Thai, P.; Dunbabin, M.; Morawska, L. De invloed van luchtvochtigheid op de uitvoering van een goedkope lichtdeeltjesmassasensor en het effect van atmosferische mist. *Atmos. Meas. Tech.* **2018**, *11*, 4883–4890.

19. De Jonge, D. *Correctiefactoren Met - One BAM1020 PM10 en PM2.5 gedurende 2018*; Public Health Service (GGD): Amsterdam, Nederland, 2019. (in het Nederlands)

20. Zimmerman, N.; Presto, AA; Kumar, SPN; Gu, J.; Haurlyiuk, A.; Robinson, ES; Robinson, AL;

Subramanian, R. Een machine learning kalibratiemodel met behulp van willekeurige bossen om de sensor te verbeteren prestaties voor goedkopere luchtkwaliteitsbewaking. *Atmos. Meas. Tech.* **2018**, *11*, 291–313.

21. Gerboles, M.; Spinelle, L.; Kotsev, A.; Signorini, M.; Srl, L. Aircenseur: een open ontworpen multisensor platform voor monitoring van de luchtkwaliteit. In Proceedings of the Fourth Scientific Meeting EuNetAir, Linköping, Zweden, 3–5 juni 2015; pp. 3–5.

22. Kotsev, A.; Schade, S.; Craglia, M.; Gerboles, M.; Spinelle, L.; Signorini, M. Luchtkwaliteit van de volgende generatie Platform: openheid en interoperabiliteit voor het internet der dingen. *Sensoren* **2016**, *16*, 403.

Sfeer **2019**, *10*, 445

22 van 22

23. Castell, N.; Maat, FR; Lahoz, WA; Schneider, P.; Vogt, M.; Bartonova, A. De stedelijke luchtkwaliteit in kaart brengen in bijna realtime met behulp van observaties van goedkope sensoren en modelinformatie. *Environ. Int.* **2017**, *106*, 234–247.

24. McAllister, ST Het Verdrag betreffende toegang tot informatie, inspraak bij besluitvorming, en

Toegang tot de rechter inzake milieuaangelegenheden. *Colo. J. Int. Environ. Rechtsbeleid V* **1999**, *10*, 187.

25. Manders, AM; Bultjes, PJ; Curier, L.; van der Gon, D.; Hugo, A.; Hendriks, C.; Jonkers, S.; Kranenburg, R.; Kuenen, JJ; Segers, AJ Curriculum vitae van het LOTOS – EUROS (v2.0) chemietransportmodel.

Geosci. Model Dev. **2017**, *10*, 4145–4173.

26. Longstichting. Hoe gezond is de lucht bij jou? (Hoe schoon is uw lucht?) Online beschikbaar:

<https://www.longfonds.nl/gezondelucht/> (toegankelijk op 17 juni 2019).

27. Liu, H.-Y.; Schneider, P.; Haugen, R.; Vogt, M. Prestatiebeoordeling van een voordelige PM_{2.5}-sensor voor een in de buurt van de periode van vier maanden in Oslo, Noorwegen. *Sfeer* **2019**, *10*, 41.

28. RIVM. PM₁₀ boven Nederland vanwege Easter Fires in Duitsland. Beschikbaar online:

<https://www.rivm.nl/nieuws/verhoogde-fijnstofconcentraties-op-eerste-paasdag> en Embedded Video

<https://www.ovid.nl/rivm/aco/2019/rivm-aco-20190423-id2ilv1f5-web-hd.mp4> (bezoekt op 14 juni 2019).

29. The Things Network. Online beschikbaar: <https://www.thingsnetwork.org/> (toegankelijk op 18 juni 2019).

30. Atlas Leefomgeving. Online beschikbaar: <https://www.atlasleefomgeving.nl/kaarten> (toegankelijk op 14 juni 2019).

31. Liang, S.; Huang, C.-Y.; Khalafbeigi, T. *OGC SensorThings API Deel 1: Sensing, versie 1.0.*; Open Geospatial Consortium: Wayland, MA, VS, 2016.

32. Clements, AL; Griswold, WG; Rs, A.; Johnston, JE; Herting, MM; Thorson, J.; Collier-Oxandale, A.; Hannigan, M. Low-cost monitoring tools voor luchtkwaliteit: van onderzoek tot praktijk (een workshop Samenvatting). *Sensoren* **2017**, *17*, 2478.

33. Morawska, L.; Thai, PK; Liu, X.; Asumadu-Sakyi, A.; Ayoko, G.; Bartoňová, A.; Bedini, A.; Chai, F.;

Christensen, B.; Dunbabin, M.; et al. Toepassingen van goedkope sensortechnologieën voor luchtkwaliteit monitoring en blootstellingsbeoordeling: hoe ver zijn ze gegaan? *Environ. Int.* **2018**, *116*, 286–299.

34. Lewis, A.; Edwards, P. Valideer persoonlijke luchtvervuilingssensoren. *Nature* **2016**, *535*, 29–31.

35. Apte, JS; Messier, KP; Gani, S.; Brauer, M.; Kirchstetter, TW; Lunden, MM; Marshall, JD; Portier, CJ; Vermeulen, RC; Hamburg, SP High-Resolution Air Pollution Mapping with Google Street View Cars:

Big data benutten. *Environ. Sci. Technol.* **2017**, *51*, 6999–7008.

36. Jerrett, M.; Donaire-Gonzalez, D.; Popoola, O.; Jones, R.; Cohen, RC; Almanza, E.; De Nazelle, A.; Mead, I.;

Carrasco-Turigas, G.; Cole-Hunter, T.; et al. Validatie van nieuwe luchtvervuilingssensoren om de blootstelling te verbeteren schattingen voor epidemiologische analyses en burgerwetenschap. *Environ. Res.* **2017**, *158*, 286–294.

© 2019 door de auteurs. Licentiehouder MDPI, Basel, Zwitserland. Dit artikel is een open toegang

artikel gedistribueerd onder de voorwaarden van de Creative Commons Naamsvermelding

[CC BY](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) -licentie (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

