

## Kalibratie van low-cost sensoren voor lokale Luchtkwaliteitsmetingen in de regio St. Anthonis

### Achtergrondinformatie

De EU-normen en WHO advies niveaus voor de gezondheidsrisico berekeningen gaan uit van *blootstelling* (concentratie berekening over een langere periode van bijv. een dag of een jaar). Het Schone Lucht Akkoord verwacht (lokale) maatregelen die leiden tot een lagere lokale blootstelling aan emissies, o.a. (ultra) fijn stof, roet (soot), ammoniak, stikstofoxiden, geur, geluid, etc. Om tot inzicht te komen van de blootstelling zijn er lokale concentratie metingen noodzakelijk. Door het uitblijven van vragen en interacties met de lokale beleidsmakers blijft de duiding van de meetresultaten en visualisatie na 4 jaar meten teveel technisch giswerk: *wat wil je weten met dit meten?*

### De aanleiding van dit document

Naar aanleiding van een vraag over de kalibratie van metingen door leden van Team Lokaal, gemeente Land van Cuijk, probeert de Stichting met dit document hierop enkele antwoorden te geven en deelt haar ervaringen met de lokale metingen. De Stichting hoopt dat de meetresultaten en analyses van de data beter te begrijpen zijn.

### Samenvatting

Low-cost sensoren worden in meer of mindere mate beïnvloed door lokale relatieve vochtigheid, temperatuur, door (lokale) wind en regen, maar ook door de werking en onderhoud van de filterinstallaties.

De hamvraag bij de beoordeling van de lokale metingen is: *wat voeg je lokaal aan de emissies toe t.o.v. het niveau van buiten de betreffende regio?*

Referentie metingen bijv. station Vredepeel zijn altijd noodzakelijk en helpen bij de data analyse.

Bij de data analyse en visualisatie van de lokale luchtkwaliteitsmetingen – metingen met low-cost sensoren – is een validatie en calibratie van de metingen noodzakelijk. De Stichting gebruikt bij de waardering van met name fijn stof metingen regressie berekeningen die gerelateerd zijn aan één type sensor (Sensirion SPS30) en de sensor (MetOne BAM1020) van een nabij gelegen landelijk meetstation in Vredepeel. Deze calibratie algoritmen (zie calibratie tabel) zijn vastgesteld in 2020 over een periode van een half jaar met sensoren op de locatie in Vredepeel. Weersinvloeden zoals wind en regen worden (nog) niet berokken in deze berekeningen. De correctieve berekeningen worden alleen toegepast bij de data analyses zoals bijv. voor de real-time fijn stof grafieken gepubliceerd voor en door de Stichting. Pas op: de low-cost real-time metingen, algoritmen, validatie en de calibratie correcties zijn lokaal afhankelijk. Deze analyses zijn indicatief.

De Stichting geeft de metingen real-time in onbewerkte vorm zo volledig mogelijk door aan derden zoals bijv. Sensors.Community en het RIVM dataportaal. Op het gedeelte van de doorgegeven metingen dat de dataportalen opslaan en/of gebruiken heeft de Stichting geen invloed. De Stichting laat de validatie en kalibratie berekeningen dan ook geheel over aan deze dataportalen.

De Stichting beperkt zich alleen tot real-time low-cost fijn stof concentratie metingen met name ligt de focus op PM<sub>2.5</sub>. Dit om redenen dat real-time ammoniak, ozon, stikstofoxiden, geur, etc. sensoren voor de Stichting te kostbaar zijn.

De validatie en kalibratie berekeningen hebben een kwalitatieve invloed op de real-time visualisatie (grafieken) en publicaties. Het aantal lokale meetpunten in een regio zijn maar gering. Dit is van invloed op de data analyses en op de onzekerheidsfactor in de luchtkwaliteitsconclusies voor een lokaal gebied.

### **Enkele punten van aandacht**

Real-time emissie concentratie metingen zijn noodzakelijk om *lokaal* inzicht te geven in de blootstelling aan ongezonde stoffen. En belangrijker ze monitoren de effectiviteit van de lokale (beleids-)maatregelen. Het doel van gezondheidsrisico duiding (blootstelling) op straatniveau kan niet zonder deze lokale concentratiemetingen.

Waarom en waarvoor meten we eigenlijk? Zonder duidelijkheid over de mogelijke maatregelen en ondernomen acties en mogelijke maatregelen heeft het lokaal meten geen zin. Er is een gemis aan duidelijkheid over het doel van de metingen. Alleen acties ondernemen t.a.v. fijn stof metingen door burgers, bewustwording van emissies op gezondheid, en subsidie verlening bij schoorsteen ontmanteling is ons inziens wat te kort door de bocht.

### **Publicatie van metingen via de website van Behoud de Parel loopt ten einde.**

Voor en na de rapportages van 2022 (3 jaar meten in St. Anthonis, wat nu?) en 2023 (notitie Werkkaders meetprojecten) van de Stichting en ver. Behoud de Parel is er vrijwel geen gebruik gemaakt van de validatie, kalibratie en visualisatie van de metingen van de Stichting op de website van Behoud de Parel. Behoud de Parel stopt in de zomer van 2024 daarom met deze serviceverlening aan de Stichting. Dit houdt in dat de resultaten van de validatie en kalibratie daarna niet meer door de website van Behoud de Parel inzichtelijk gemaakt worden.

Operationele checks, data acquisitie en doorgifte van (ruwe) metingen van de Stichting naar derden, zoals bijv. de dataportalen van Sensors.Community, RIVM Samen Meten Dataportaal, AQICN.org, AirTube.info, etc. zal wel na de zomer gecontinueerd worden. Deze dataportalen verrichten hun data analyses en visualisatie elk op hun eigen wijze.

### **Kwaliteit van (alle) fijn stof metingen**

Voor referentie metingen van de sensoren dient een meetkit met de toegepaste type sensor in de buurt geplaatst te zijn van bij voorkeur een *referentie (landelijk) meetstation*. Hierdoor wordt kalibratie van de lokale metingen in de betreffende regio mogelijk gemaakt. Tevens ontstaat op deze manier inzicht over het verschil van fijn stof niveaus en lokale invloeden (temperatuur en luchtvochtigheid).

Vrijwel overal gebruikt men bij de z.g. low-cost fijn stof sensors alleen het deel met de gewichtswaarden – de Nova sensor is van een ouder type en geeft alleen maar de metingen als gewicht weer. De gewichtswaarden van de low-cost sensoren worden aan de hand van de deeltjes tellingen m.b.v. laboratorium proeven berekend door de fabrikant van de sensor. De lokale invloeden van bijv. luchtvochtigheid en temperatuur worden op deze manier dan ook niet meegenomen in de weergegeven gewichtswaarden. Voor low-cost fijn stof

sensoren die hoofdzakelijk toegepast worden voor binnenshuis i.t.t. toepassingen buitenshuis is de weergave van metingen als gewicht minder een probleem.

Alle low-cost metingen zijn per definitie indicatief. Alleen door de metingen over lange perioden te vergelijken wordt een redelijke indruk verkregen in hoeverre de lokale metingen met lokale referentie sensoren overeenkomen.

Kortom lokale validatie en kalibratie m.b.v. referentie metingen is een voorwaarde voor een goede weergave van de resultaten. Bepaling van de relatieve vochtigheid en buitentemperatuur op de locatie van de meetkit draagt bij tot verbetering<sup>3</sup> van de kwaliteit van de meting en de data analyse.

### Waar staan de meetkits van de Stichting?

Van begin 2019 heeft de Stichting Burgerwetenschappers Land van Cuijk heeft ca. 20 meetkits voor het meten van fijn stof concentraties en temperatuur en relatieve vochtigheid in de regio St. Anthonis opgesteld staan. De meetkits zijn uitgerust met aanvankelijk een Plantower PMSx003 en vanaf 2020 uitgebreid ca. 12 meetkits met een Sensirion SPS30 fijn stof sensors.

Om referentie metingen mogelijk te maken staan een drietal meetkits<sup>1</sup> met zowel de Plantower en Sensirion sensoren en tevens een meetkit met de door RIVM aanvankelijk veel toegepaste Nova SDS011 fijn stof sensor opgesteld boven op ca. 10 km afstand gelegen RIVM/LML landelijk meetstation te Vredepeel. Dit maakt een vergelijking van locatie verschillen en calibratie van de metingen mogelijk.



Het meetstation van RIVM/LML meet fijn stof PM<sub>10</sub> en PM<sub>2.5</sub> m.b.v. MetOne BAM1020. Deze verfijnde referentie apparatuur meet elk uur het gewicht van de opgezogen en gedroogde fijn stof via een inlaat van de buitenlucht. Ook deze referentie metingen worden bijgehouden.

### Hoe goed zijn Low-Cost Sensoren (LCS)?

De low-cost sensoren die voor lokale metingen gebruikt worden zijn ontwikkeld voor *binnenshuis toepassingen* en zijn in wezen z.g. deeltjes tellers: ze *tellen de fijn stof deeltjes per grootte orde*<sup>2</sup>. De tellingen worden door de fabrikant van de sensor vervolgens met een vast algoritme naar gewichtswaarden omgerekend.

De hoge luchtvochtigheid (RH > 70%) in bijv. de nachtelijke uren is hoog en valt meestal buiten de low-cost fijn stof sensor specificaties. Er is in het door de fabrikant gebruikte algoritme geen rekening gehouden met fluctuaties van de temperatuur of relatieve vochtigheid. Het probleem is dan ook dat op deze manier meten je in wezen appels met peren aan het vergelijken bent.

M.a.w. de gevonden waarden zijn indicatief en er zijn verschillen met de referentie sensoren.

De weersinvloeden moet je voortdurend meenemen in je kalibratie-berekeningen. De kalibratieberekeningen<sup>3</sup> zijn daarmee lokaal afhankelijk. Het samenstellen van de kalibratie voor deze low-cost metingen is hierdoor complex.

1 Overzicht van ongekalibreerde metingen door de MySense meetkits en BAM1020 referentie sensor op de lokatie station van LML te Vredepeel  
<http://behouddeparel.nl/meetkits/87>

2 Een technische uitleg over de werking van de sensoren: A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers' Perspectives, Alfado e.a., 2020, Sensors MDPI publicatie <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/23/6819>

3 RIVM onderzoek over o.a. kalibratie problematiek low-cost fijn stof sensoren: <https://www.mdpi.com/2073-4433/10/8/445> (Atmosphere publicatie, augustus 2018)

Door de beperking aan middelen worden lokale klimatologische invloeden zoals regen en wind niet gemeten. De meetkits van de Stichting meten wel de lokale temperatuur en luchtvochtigheid. Hoewel de invloed van RH op de lokale fijn stof metingen van grote invloed zijn, worden die invloeden (nu nog) niet meegenomen in de kalibratieberekeningen voor een bepaalde locatie. Voor zover bekend gebeurt dit (nog?) nergens.

Zoals hieronder uit de kalibratie/regressie tabel blijkt zijn met name de metingen van PM<sub>2.5</sub> in Vredepeel redelijk vergelijkbaar met de lokale BAM1020 metingen. Voor PM<sub>10</sub> is dat veel minder het geval. PM<sub>2.5</sub> is t.a.v. fijn stof emissies is daarom de belangrijkste indicator. Het door de Stichting toegepaste kalibratie-algoritme – het algoritme berekent de gewichtswaarden naar het type Sensirion SPS30 – is alleen bepalend voor de regio Vredepeel en zal voor andere verder gelegen dan ca. 15 km regio's anders berekend moeten worden.

### **De fijn stof en ammoniak metingen in St. Anthonis**

Eind september 2022 verscheen de notitie '[Drie jaar meten in agrarisch gebied – wat nu?](https://www.bwlvc.eu/wp-content/uploads/2020/03/3JaarMetenInAgrRegioWatNu.pdf)' (PDF document <https://www.bwlvc.eu/wp-content/uploads/2020/03/3JaarMetenInAgrRegioWatNu.pdf>). Hierin wordt een overzicht op straat niveau gepresenteerd van de gevalideerde en gekalibreerde real-time fijn stof, maandelijkse stikstof en ammoniak metingen gedurende de periode 2019-2022 in de regio St. Anthonis. De visualisatie van deze real-time gevalideerde en gekalibreerde real-time fijn stof, temperatuur en luchtvochtigheidsmetingen in St. Anthonis en nabij het RIVM referentie meetstation in Vredepeel zijn in te zien bij op de website van ver. Behoud de Parel<sup>4</sup>.

### **Het probleem van kleine aantallen sensoren**

Alle lokale meetinitiatieven hebben maar enkele tientallen meetkits operationeel. Al deze projecten, ook de metingen door de Stichting, worden voor het grootste deel doorgegeven naar derden zoals RIVM dataportaal<sup>5</sup>, Sensors.Community<sup>6</sup> en zelfs naar bijv. AQICN.org<sup>7</sup> en AirTube.info<sup>8</sup>. Van oorsprong worden de metingen meestal direct naar Sensors.Community (Luftdaten) gestuurd. De doorgifte beslaat helaas maar een selectie van alle beschikbare meetgegevens van de sensors. De metingen die doorgegeven worden zijn z.g. *ruwe meetdata* (zonder bewerkingen zoals validatie en kalibratie). Veel dataportalen, ook het RIVM, betrekken hun data van Sensors.Community.

Dit houdt in dat i.t.t. tot de duizenden meetkits die het RIVM tot zijn beschikking heeft voor het landelijk model (tot op gemeente niveau), er voor de statische berekening op straat niveau er maar een zeer beperkt aantal metingen ter beschikking zijn. De onzekerheidsfactor in deze lokale berekeningen is daarom hoger. Voor lokale toepassingen dienen de metingen nauwgezet (statistisch en operationeel) gecheckt worden: zowel op operationeel niveau, bij ontvangst van de data - de data validatie fase, en de kalibratie bij analyse en visualisatie.

---

4 Website pagina met overzicht van regio St. Anthonis, Land van Cuijk  
[http://behouddeparel.nl/?q=Regionaal Overzicht 86](http://behouddeparel.nl/?q=Regionaal%20Overzicht%2086).

5 Statistiek analyse gereedschap (Shiney gebaseerd op R en R-Studio) voor de metingen uit de database van het RIVM dataportaal. Zie:

<https://www.samenmeten.nl/dataportaal/samen-analyseren-tool>

6 <https://maps.sensor.community/#12/51.6731/5.8903>

7 <https://aqicn.org/station/@78100/#/s:78100/n:mullemsdijk-sint-anthonis-the-netherlands>

8 Een uitstekende website met fijn stof en andere meetgegevens: <https://airtube.info/?pos=51.54825656210027,5.900344848632813,11>

Het is gebleken dat de onderlinge verschillen in de productie batch niet significant zijn. M.a.w. de regressie test bij aanvang van de metingen om de verschillen tussen de sensoren van hetzelfde makelij te verkennen, wordt momenteel niet meer toegepast. De validatie- en plausibiliteitscheck vangt de fouten van de sensor in het veld enigszins op.

De Stichting voert voor de visualisatie van de meetdata in de grafieken een validatie en kalibratie filters toe. De gebruikte statistische filters en programmatuur is op de websites van de Stichting en Behoud de Parel (nu nog te vinden tot de zomer van 2024) en vrij te gebruiken onder Open Source (OSS) condities.

## Operationele check van de meetdata

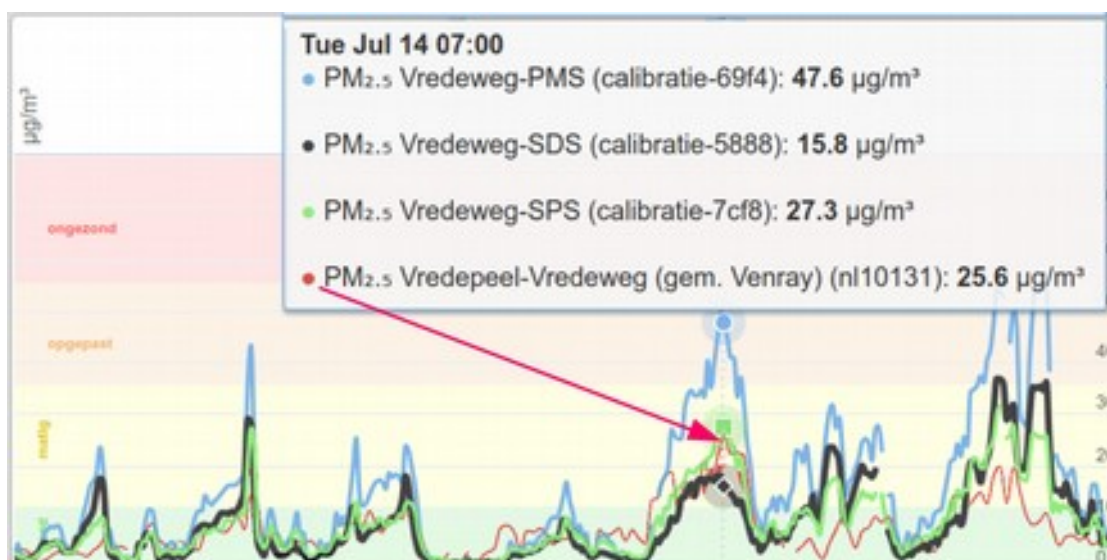
De meetdata wordt voor de visualisatie fase (grafieken) gecheckt of de meetkit nog op de locatie staat en waar hij thuishoort. De metingen worden nagekeken of de waarden niet te constant zijn bijv. door verzadiging van de rel. vocht sensor, door een verstopping van de fijn stof sensor in de luchtstroom – door een spinnetje, door een ventilator die stil staat of doordat de power voorziening te laag is, en/of doordat men vergat de stekker terug te zetten in het stopcontact. Soms is een bezoek aan de locatie dan noodzakelijk. Met een gering aantal meetkits zijn dit soort storingen problematisch voor een goede data analyse.

## Validatie van meetdata

Zodra er een redelijke reeks van metingen bekend is wordt de data statistisch over een periode van enkele dagen gevalideerd. Er wordt dan gelet op: liggen de metingen wel binnen de specificaties van de betreffende sensor, nul metingen, metingen die te extreem zijn, zijn de fijn stof en RH waarden positief, is de waarde redelijk t.a.v. zijn voorganger of de volgende meting (spikes), etc.? Deze statistische validatie vindt plaats met behulp van standaard statistische checks zoals Chi-kwadraat en Grubbs. Onwaarschijnlijke waarden worden geïnvalideerd en verder niet betrokken in het volgende validatie check of visualisatie.

## Kalibratie van meetdata

De drie meetkits van de Stichting en ver. Behoud de Parel zoals die bovenop het RIVM/LML meetstation in Vredepeel hangen, hangen daar als referentie met de lokale metingen elders in de regio St. Anthonis. Bijvoorbeeld tav. de vraag '*zijn de verschillen wel verklaarbaar?*'. De metingen worden ook gebruikt voor regressie





berekeningen in referentie met de MetOne fijn stof sensor maar ook onderling per type sensor.

De grafiek met de (ongekalibreerd) waarden visualiseert het verschillen tussen de vier typen toegepaste fijn stof sensoren voor de 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> week in juli 2020. Duidelijk is te zien dat de Plantower sensor nogal overdrijft (tot zelfs met een factor 2) zodra de fijn stof concentratie boven de 15 µg/m<sup>3</sup> komt. Voor PM<sub>2.5</sub> van Nova en Sensirion lopen de grafieken redelijk synchroon. De Nova en Sensirion PM<sub>2.5</sub> waarden lopen iets minder gelijk met de metingen van de MetOne. Voor PM<sub>10</sub> is dat een stuk minder. Op zich is dat laatste niet zo erg als de focus ligt op PM<sub>2.5</sub> waarden. Immers PM<sub>2.5</sub> (massa) concentraties heeft i.v.m. de gezondheidsproblematiek momenteel de meeste aandacht.

Een belangrijke kalibratievraag luidt: met welke zekerheids- (in jargon: R-kwadraat) factor (liefst is  $R^2 > 0.7$ ) en met welk algoritme kunnen de meting herberekenen zodat we de grafieken beter onderling kunnen vergelijken. De berekening is afhankelijk van lokale omstandigheden en onderstaande tabel geldt alleen voor locaties nabij Vredepeel.

weergaven in massa type sensors	PM <sub>2.5</sub> R square (R <sup>2</sup> )	PM <sub>2.5</sub> beste fit (lineaire regressie)	PM <sub>10</sub> R square (R <sup>2</sup> )	PM <sub>10</sub> beste fit (lineaire regressie)
SPS30 ↔ SDS011	0.89	+ 4%	0.79	+ 20%
PMSx003 ↔ SDS011	0.90	- 50%	0.71	- 66%
SPS30 ↔ PMSx003	0.94	+ 71%	0.80	+ 45%
BAM1020 ↔ SDS011	0.58	+ 36%	0.14	- 50%
BAM1020 ↔ SPS30	0.73	+ 40%	0.19	- 43%
BAM1020 ↔ PMSx003	0.65	+ 234%	0.14	+ 57%

Bovenstaande calibratie tabel geeft n.a.v. een regressie berekening in 2<sup>e</sup> helft van 2020 uitgevoerd is m.b.t. tot de vier typen fijn stof sensoren in Vredepeel. De regressieberekening is helaas nu wat gedateerd!

De real-time visualisatie (grafieken) die getoond worden op de website van Behoud de Parel daar zijn afgezien van de metingen door de MetOne de meetwaarden berekend *alsof alle meetkits uitgevoerd zijn met een Sensirion SPS30 sensor*.

## Een selectie van de gebruikte referentie informatie

*Development and Implementation of a Platform for Public Information on Air Quality, Sensor Measurements, and Citizen Science (RIVM, 1 augustus 2018)*<sup>9</sup>

De publikatie in Atmosphere (MDPI) belicht de uitdagingen bij toepassing van low-cost sensoren bij luchtkwaliteitsmonitoring in samenwerking met lokale citizen science initiatieven. De kalibratie techniek is nog in ontwikkeling. Enkele

9 <https://www.mdpi.com/2073-4433/10/8/445>

voorbeelden proeven met fijn stof sensor (Nova) in Amsterdam en Utrecht, en kalibratie algoritme worden meer in detail besproken.

*Size-Resolved Field Performance of Low-Cost Sensors for Particulate Matter Air Pollution (Environmental Science and Technical Letters, 2023, Rueda e.a.)<sup>10</sup>*

Een onderzoek naar meetverschillen tussen een drietal recente low-cost fijn stof sensoren (Piera-1, Plantower en Sensirion) ten opzichte van een professionele fijn stof sensor (deeltjes teller) van de fabrikant Grimm.

*Overview of methods to assess population exposure to ambient air pollution (WHO, 26 september 2023)<sup>11</sup>*

Gebaseerd op een keur van wetenschappelijke onderzoeken geeft het artikel een goed overzicht van luchtkwaliteitsmeet- en model vormende methoden om een inschatting te kunnen maken van luchtkwaliteitsconcentraties en monitor maatregelen tot op straat niveau bijv. met low-cost sensoren en referentie sensoren. De focus ligt op de blootstelling aan fijn stof PM<sub>2.5</sub> als indicator (Sustainable Development Goal SDG indicator 11.6.2), en overgang naar concentratie metingen van aantal deeltjes (PNC Particulate Number Concentration van bijv. NOx). Het geeft een zwakte en sterkte overzicht van de verschillende gehanteerde modellen en afhankelijkheid van de low-cost metingen t.a.v. bijv. luchtvochtigheid.

## Nawoord

Met fijn stof low-cost fijn stof sensorenconcentratie metingen meet je lokale concentraties. Ook na validatie en kalibratie zijn dit soort concentratie metingen indicatief. Uiteindelijk moeten deze lokale metingen via een data analyse tot duidelijkheid van *de blootstelling aan bepaalde emissies*.

## Waarom en waarvoor meten we eigenlijk?

Ter voorbereiding van de SLA Participatiedag op 29 november 2023 georganiseerd door RIVM Bilthoven, is de notitie '[Werkkader project luchtkwaliteitsmeetnet-werken](#)'<sup>12</sup> samen met ver. Behoud de Parel uitgebracht. Hierin wordt geprobeerd een antwoord op de vraag 'Wat nu?' te geven: het ontbreekt meestal aan een data analyse die aansluit bij de informatiebehoefte van de lokale overheid. Zonder duidelijkheid over de mogelijke maatregelen en ondernomen acties en mogelijke maatregelen heeft het lokaal meten geen zin.

Het mag niet alleen een project zijn dat alleen maar leidt tot bewustwording en daarmee niet leidt tot het doel van de afspraken binnen het Schone Lucht Akkoord: maatregelen en acties met een 50% gezondheidswinst op een niet al te lange termijn.

**“Om het meten van nut te laten zijn  
moet je als lokale overheid en ondernemer nu toch wel  
snel bokkensprongen gaan maken!**

**Tom Poes, verzin een list.**

“

Auteur: Teus Hagen, MySense project van ver. Behoud de Parel.

10 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.estlett.3c00030?ref=pdf>

11 <https://www.who.int/publications/i/item/9789240073494>

12 PDF document <https://www.bwlvc.eu/wp-content/uploads/2020/03/Werkkader-en-Organisatiestructuur-Luchtkwaliteitsmeetprojecten.pdf>