



Een blauwdruk voor het opzetten van een gemeentelijk sensornetwerk voor luchtkwaliteit

Jelle Hofman, Jan Peters, Martine van Poppel, Maarten Spruyt, Jo Van Laer, Bart Baeyens, Christophe Stroobants, Evelyne Elst, Bart Roels, Elke Delbare, Wim Van Essche, Evy Gillijns, Ann Cochez

2021/HEALTH/R/2608

December 2021



VITO NV

Boeretang 200 - 2400 MOL - BELGIE
Tel. + 32 14 33 55 11 - Fax + 32 14 33 55 99
vito@vito.be - www.vito.be

BTW BE-0244.195.916 RPR (Turnhout)
Bank 375-1117354-90 ING
BE34 3751 1173 5490 - BBRUBEBB

SAMENVATTING

Dit rapport bundelt inzichten uit het project “Gemeentelijk sensornetwerk voor luchtkwaliteitsmetingen” binnen de oproep ‘City of Things’ (CoT) van het Vlaams Agentschap Innoveren & Ondernemen (VLAIO). De doelstelling van dit project is om **noodzakelijke kennis** te verwerven om op een **wetenschappelijk onderbouwde manier** een **sensornetwerk voor luchtkwaliteitsmetingen** op te zetten op het **niveau van een gemeente**.

Hiervoor werd een **blauwdruk** (HOOFDSTUK 1) ontwikkeld als een **praktische tool** waar lokale besturen mee aan de slag kunnen indien ze een sensornetwerk voor luchtkwaliteit willen uitrollen. Deze blauwdruk omvat verschillende fasen (voortraject, sensorselectie, uitrol, opvolging, analyse & interpretatie en communicatie) om tot een succesvolle uitrol van sensoren te komen en probeert te differentiëren ten opzichte van voorgaande roadmaps door middel van **praktische voorbeelden**, **concrete tools** (vb. selectietool sensoren) en **ervaringen** en **take-aways** uit stakeholder workshops en **2 concrete pilootstudies** met luchtkwaliteitssensoren in Sint-Niklaas en Kampenhout.

Het inhoudelijk voortraject (HOOFDSTUK 2 – HOOFDSTUK 7) om tot deze blauwdruk te komen beschrijft onder meer een literatuurstudie en marktanalyse, workshops en bevestigingen van lokale overheden, een co-design workshop over communicatie, een rapport over IoT netwerkoplossingen, 2 pilootstudies met sensoren in Sint-Niklaas en Kampenhout. Tot slot geven we in HOOFDSTUK 8 nog een oplistings van alle zaken die bevestigd moeten worden bij het opmaken van een bestek voor een sensornetwerk.

Het project toont aan dat luchtkwaliteitssensoren **succesvol kunnen worden uitgerold** in steden en gemeenten en **bruikbare inzichten** kunnen opleveren over (in dit geval) bijdrage van verkeer en impact van verkeersmaatregelen. De betrokken gemeenten geven aan dat de resultaten uit de pilootstudies een **antwoord bieden op de vooropgestelde onderzoeksvraag**, geplande verkeersmaatregelen voldoende verantwoorden en bruikbaar zijn in hun communicatie naar de burger. Ook vanuit een operationeel standpunt lijken de gemeenten tevreden met de data, beschikbaarheid en opvolging/visualisatie.

Daarentegen kunnen we ook concluderen dat het **zelfstandig opzetten van een sensornetwerk op gemeentelijk/stedelijk niveau (nog) niet als haalbaar** wordt beschouwd. Vooral voor wat betreft kalibratie, betrouwbaarheid en interpretatie van de meetgegevens geven de gemeenten voorkeur aan gehele of gedeeltelijke **ondersteuning van experts en/of externe partijen**.

INHOUD

Samenvatting	3
Inhoud	4
Lijst van tabellen	6
Lijst van figuren	7
Lijst van afkortingen	8
HOOFDSTUK 1. BLAUWDRUK VOOR EEN GEMEENTELIJK SENSORNETWERK	9
HOOFDSTUK 2. AANLEIDING	1
HOOFDSTUK 3. DOEL & FUNCTIONELE VEREISTEN	5
3.1. Opzet	5
3.2. resultaten enquête	5
3.2.1. Drijfveren	6
3.2.2. Meetopzet	6
3.2.3. Uitdagingen	7
3.3. workshop lokale overheden	7
3.3.1. ECOSYSTEEM	8
3.3.2. onderzoeksvraag	9
3.3.3. meetopzet	10
3.4. Conclusies doel & functionele vereisten	11
HOOFDSTUK 4. BESCHIKBARE SENSOREN	13
4.1. context	13
4.2. Workshop lokale overheden	14
4.3. Marktanalyse, Literatuurstudie en multicriteria-analyse	15
4.4. Selectietool	19
4.5. Conclusies	20
HOOFDSTUK 5. NETWERKVEREISTEN	21
5.1. Opzet	21
5.2. netwerktechnologieën	21
5.3. conclusies	22
HOOFDSTUK 6. VISUALISATIE EN COMMUNICATIE	23
6.1. opzet	23
6.2. Co-design workshop	23
6.3. workshop lokale overheden	24

HOOFDSTUK 7. USE CASES	27
7.1. <i>Opzet</i>	27
7.2. <i>Pilootstudies in CoT project</i>	27
7.2.1. <i>datakwaliteit</i>	28
7.3. <i>Pilootstudie Kampenhout</i>	28
7.3.1. <i>opzet</i>	28
7.3.2. <i>sensor netwerk</i>	28
7.3.3. <i>resultaten</i>	29
7.4. <i>Pilootstudie Sint-Niklaas</i>	33
7.4.1. <i>Opzet</i>	33
7.4.2. <i>sensor netwerk</i>	33
7.4.3. <i>Resultaten</i>	33
7.5. <i>Inzichten uit de pilootstudies</i>	35
7.6. <i>Ervaring betrokken gemeenten</i>	35
7.6.1. <i>Evaluatie pilootstudie</i>	35
7.6.2. <i>Knelpunten sensor netwerken</i>	36
7.6.3. <i>Toekomstperspectief</i>	36
7.6.4. <i>Conclusie</i>	37
HOOFDSTUK 8. BUSINESS CASE	38
8.1. <i>Opzet</i>	38
8.2. <i>VOORTRAJECT</i>	38
8.3. <i>Aankoop sensoren</i>	38
8.4. <i>Installatie/Opvolging/kwaliteitscontrole</i>	39
8.5. <i>analyse/visualisatie/interpretatie</i>	40
8.6. <i>Inventaris prijs/Effort</i>	40
8.7. <i>Oplijsting technische criteria voor bestek</i>	42
Literatuurlijst	47

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1: Overzicht studies en rapporten gebruikt als input voor deze blauwdruk _____	3
Tabel 2 Samenvattende resultaten van de marktbevraging bij 14 sensorfabrikanten (uitgevoerd in 2019) _____	18
Tabel 3 Eigenschappen van IoT netwerktechnologieën WiFi, SigFox, LoRaWAN en NB-IoT _____	21
Tabel 4 Hardwarevereisten voor verschillende sensortoepassingen (uit Hofman et al. ¹) _____	22
Tabel 5 Gewenste functionaliteiten van een visualisatieplatform met betrekking tot informatie over de metingen en geïmplementeerde/geplande maatregelen _____	24
Tabel 6: Oplijsting selectie criteria voor de case in Kampenhout en prestaties van sensorboxen. _	27
Tabel 7 Inventaris van kostenposten bij de uitrol van een sensornetwerk _____	41
Tabel 8 Technische criteria voor sensorleveranciers _____	42
Tabel 9 Vereiste eenheden waarin de data worden weergegeven _____	46
Tabel 10 Performantiecriteri_____	46

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1 Blauwdruk voor een gemeentelijk sensornetwerk. Scoping (oranje) en best practices (groen) op basis van de ervaringen uit dit project worden aangegeven per processtap. _____	13
Figuur 2: Respons (73) drijfveren voor het meten van luchtkwaliteit _____	6
Figuur 3: Respons (73) minimale benodigde tijdsresolutie luchtmetingen _____	7
<i>Figuur 4: Stapsgewijze vereisten voor het bekomen van een sensornetwerk luchtkwaliteit _____</i>	<i>7</i>
Figuur 5 Perspectieven van 3 verschillende gebruikers (persona) van sensordata _____	8
Figuur 6 Ecosysteem van betrokken stakeholders bij een vast sensornetwerk voor zone “druk verkeer” bij persona “milieuambtenaar”.. _____	9
Figuur 7 Beoogde toepassingen voor sensornetwerken. Groene bolletjes geven selecties van milieuambtenaren tijdens workshop weer. _____	10
Figuur 8: Vereisten van een sensornetwerk voor de geaffecteerde zones “druk verkeer”. _____	11
Figuur 9: Verschil tussen sensor, sensor unit/systeem en sensor solution _____	14
Figuur 10: Selectie van optimale sensoren (buisje, miniatuurtoestel, sensor) bij het meetopzet druk verkeer _____	15
Figuur 11: Overzicht van sensoren (OEM) en sensorsystemen(SSys) ifv aantal criteria: beschikbaarheid (active/non-active), kalibratiemodel (open source of black box), commercieel beschikbaar of niet (overgenomen uit Karagulian et al. ¹⁰). _____	16
Figuur 12 Screenshots van de ontwikkelde sensor selectietool beschikbaar via de EMIS website _	20
Figuur 13 Totaalconcept visualisatiebord druk verkeer voor persona milieuambtenaar (links) en dashboard schoolroutes voor persona bewuste school (rechts). _____	26
Figuur 14 Schematische voorstelling bronbijdrage van de straat in de totale concentratie _____	29
Figuur 15 Samenvatting van NO ₂ , NO en PM ₁ meetresultaten: bijdrage van lokaal verkeer vs achtergrondconcentratie gedurende de scenarios (onder) en impact van de geïmplementeerde scenario's op de lokale NO ₂ , NO en PM ₁ bijdrage tijdens de geïmplementeerde scenario's (boven) _____	30

LIJST VAN AFKORTINGEN

PM ₁	Fijnstof met aerodynamische diameter van < 1 µm
PM _{2.5}	Fijnstof met aerodynamische diameter van < 2.5 µm
PM ₁₀	Fijnstof met aerodynamische diameter van < 10 µm
NO ₂	Stikstofdioxide
NO	Stikstofoxide
O ₃	Ozon
VMM	Vlaamse Milieumaatschappij
WHO	Wereldgezondheidsorganisatie
EEA	Europees Milieuagentschap
DIY	“Do-It-Yourself”

HOOFDSTUK 1. BLAUWDruk VOOR EEN GEMEENTELIJK SENSORNETWERK

Dit hoofdstuk omvat de blauwdruk, als praktische tool voor lokale overheden om mee aan de slag te gaan. De blauwdruk is gebaseerd op een uitgebreid voortraject dat in detail besproken wordt in HOOFDSTUK 2 - HOOFDSTUK 7.

Tot slot geven we in HOOFDSTUK 8 nog een olijsting van alle zaken die bevestigd moeten worden bij het opmaken van een bestek voor een sensornetwerk.

Op basis van de relevante ervaringen uit het voortraject met bevestigingen, workshops, co-designsessies, literatuurstudie, ... en ontwikkelde tools kunnen we de processtappen van bestaande roadmaps voor luchtkwaliteitssensoren^{1, 2} verder verfijnen met **relevante suggesties in het ontwerpproces (scoping)** en **best practices (bruikbare tools)**. Zo omvat de blauwdruk een praktische implementatie van bestaande conceptuele roadmaps waar lokale overheden meteen mee aan de slag kunnen.

Per processtap worden deze scoping en best practices hieronder opgelijst:

ONDERZOEKSVRAAG (H2)

- Definieer **gebruikers en doelgroepen** (ambtenaar, burgers, scholen, ...) en leef je in in de problematiek en perspectieven van elke doelgroep. LIFE VAQUUMS [roadmap](#) en [brainstorm templates](#) kunnen je hierbij op weg helpen.
- Definieer op welke onderzoeksvraag je een antwoord wil:
 - De gemiddelde concentratie en vergelijken met de norm voor...
 - De invloed van verkeer, industrie,... op de luchtkwaliteit in nabije omgeving
 - De variatie aan luchtkwaliteit doorheen mijn gemeente/stad
 - De impact is van een maatregel (vb schoolstraat) op de luchtkwaliteit
 - ...
- Ervaringen City of Things project:
 - Grote interesse naar problematiek rond verkeersbijdrage, lokale hotspots en blootstelling. Potentieel sensornetwerken voor evaluatie verkeersmaatregelen en sensibiliseren burgers
 - Luchtkwaliteit is vaak sterk gerelateerd met mobiliteit, klimaat, gezondheid, geluid, ... Probeer de onderzoeksvraag dan ook in een breder kader te zien door **doelgroep (burgers) en interdisciplinaire milieuambtenaren** (mobiliteit, geluid, gezondheid, ...) te betrekken.
- Bekijk welke informatie **reeds voorhanden** is:
 - [Schoolstraat](#)
 - [Low Emission Zone \(LEZ\)](#)
 - [Evolutie Luchtkwaliteit in Vlaanderen](#)
 - [Samen voor Zuivere Lucht?](#)

MEETOPZET (H2-4)

- Beschouw de algemene sensorrichtlijnen opgelijst in de [VAQUUMS sensor guidelines](#).
- Probeer aansluiting te vinden bij **bestaande meetnetwerken of initiatieven**, die zowel qua meetopzet/kalibratie, visualisatie en interpretatie misschien al belangrijke stappen hebben gezet (vb. <https://samenvoorzuiverelucht.eu/>)
- Overweeg **begunstigde partijen** uit je ecosysteem te betrekken, zij kunnen het meetopzet verrijken of financieel haalbaarder maken
- Meetplan: Zorg ervoor dat je meetplan is afgestemd op de onderzoeksvraag
 - Meetomgeving (binnen vs buitenlucht)?
 - Mobiele vs vaste meetlocaties?
 - Beschikbaarheid resultaten (5 min <> week)?
 - Visualisatie resultaten (actuele waarden, kaart, tijdreeks)?
 - Benodigde tijdsresolutie (1 seconde - 24 uur gemiddelde)?
 - Toelaatbare afwijking/nauwkeurigheid meting (<10% - >50%)?
 - Welke pollutanten (PM_{2.5}, PM₁₀, Roet, CO, CO₂, O₃, NO, NO₂, SO₂, CH₄, vluchtige organische stoffen, pollen)?
 - Hoeveel meetpunten benodigd (1 <> 50)?
- Ervaringen CoT project:
 - **NO** is (naast NO₂) een goede verkeersindicator
 - Een **achtergrondlocatie** is belangrijk om de lokale bijdrage van bronnen te meten
- Overweeg alle beschikbare meetmethoden in je meetopzet:
 - **Referentienetwerk** (open beschikbaar, uurlijks, accuraat, geen nood aan kalibratie):
vb. <https://www.irceline.be/nl/luchtkwaliteit/metingen/meetstations>
 - **DIY sensor** (real-time meting, goedkoop, nood aan kalibratie/know-how):
vb. <https://sensor.community/nl/sensors/>
 - **Sensorbox** (real-time meting, niet goedkoop, nood aan kalibratie/know-how):
vb. <http://www.aqmd.gov/aq-spec/sensors>
 - **Meetbuisje** (2-wekelijkse/maandelijkse meting, goedkoop, robuust, geen nood aan kalibratie):
vb. <https://curieuzenair.brussels/nl/hoe-werken-de-buisjes/>
 - **Draagbare meettoestel** (real-time, duur, geen nood aan kalibratie/know-how):
vb. <https://www.airqmap.be/>
- Beschouw relevante pollutanten voor de beoogde problematiek:
 - Opvolging luchtkwaliteit (gereguleerde pollutanten): PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, O₃
 - Verkeer: NO, NO₂, PM_{1/2.5}, roet (BC), UFP
 - Houtverbranding: PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀, roet (BC), polyaromatische koolwaterstoffen (PAKS)
 - Scheepvaart: SO₂, PM
 - Binnenlucht: CO₂, PM, VOCs
- Betrek (lokale) experts en/of overheidsinstellingen (VMM, ...)
- Selectie sensor(systeem):
 - Gebruik de [EMIS sensor selectietool](#) die ontwikkeld werd tijdens dit project
 - Hou **functionele vereisten** (exclusie/differentiërend), afgestemd op de onderzoeksvraag, voor ogen bij de sensorselectie: gemeten pollutanten, beschikbaarheid resultaten, plug & play, benodigde technische kennis, terugkerende kosten, levensduur sensor, temporele resolutie meting, datakwaliteit meting, prijs. Denk bovendien ook aan de **visualisatieopties** en **kwaliteitsopvolging** (van belang tijdens de uitrol en communicatie)
 - Bekijk bestaande evaluatieplatformen om een idee te krijgen van de **datakwaliteit**:
 - <http://www.airlab.solutions/en/projects/microsensor-challenge>
 - <http://www.aqmd.gov/aq-spec/evaluations>
 - <https://vaquums.eu/test-results>

UITROL (H2 en 6)

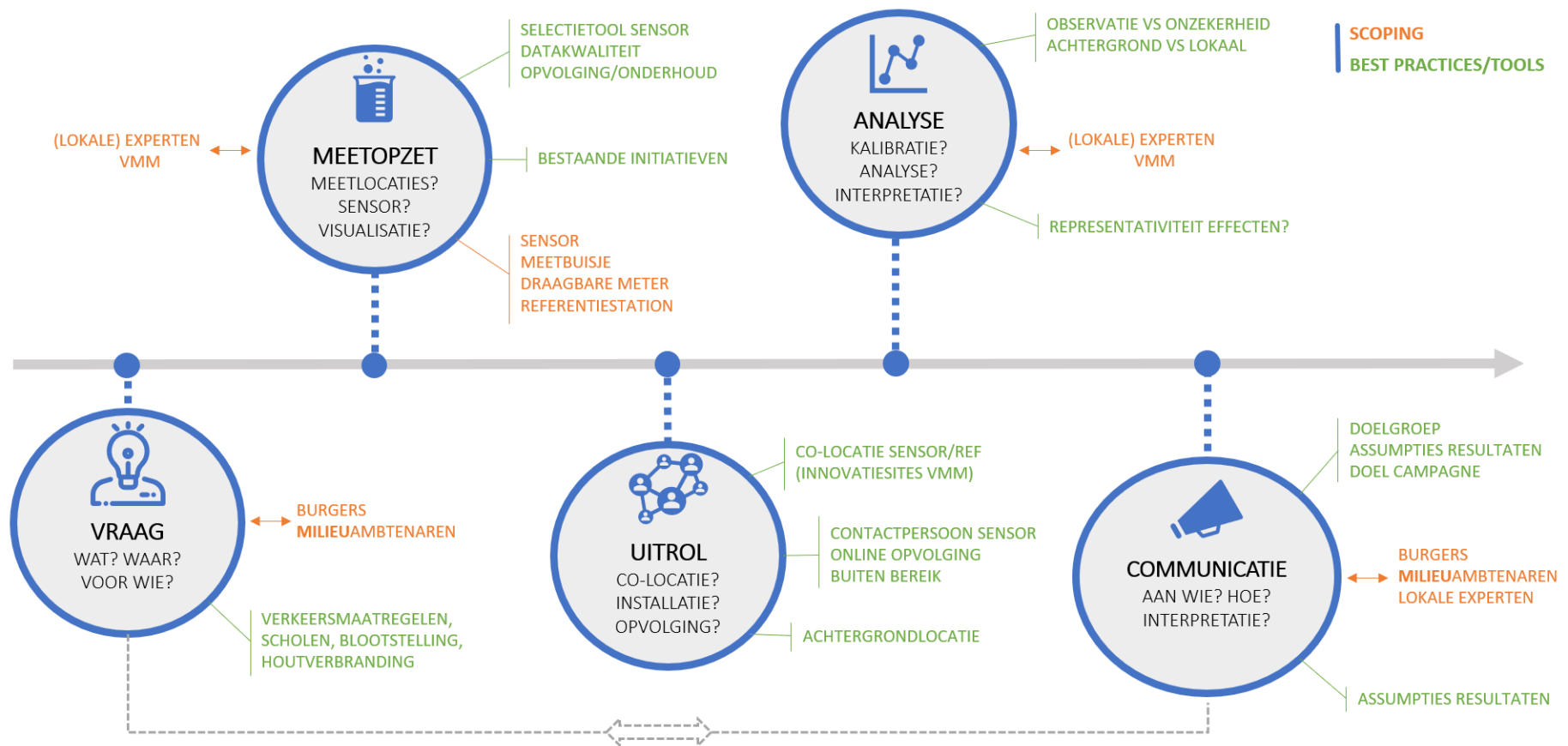
- Ervaring project: Evalueer de sensoren naast een referentiemeetstation (**co-locatiecampagne**) om onzekerheid tussen sensoren onderling en onzekerheid met betrekking tot referentiemeting te kennen! Hiervoor contacteer je best de VMM die we aanraden hierrond een dienst te ontwikkelen (openstellen meetstation voor vergelijkende metingen).
- Volg de goede werking van je sensornetwerk op en voorzie uren/effort om ter plaatse te gaan voor onderhoud/pechverhelping
- Voorzie een contactpersoon van de sensorfabrikant/leverancier waar je terecht kan met vragen
- Ervaringen CoT project:
 - Hang sensoren buiten bereik voor vandalisme (~2.5m)
 - Maak gebruik van een **achtergrondmeetlocatie** (locatie die geen invloed van nabije bronnen ondervindt (vb in stedelijk park)) om lokale effecten (vb van een beleidsmaatregel) te evalueren. Met behulp van deze meetlocatie kan je corrigeren/normaliseren voor achtergronddynamiek.

ANALYSE (H2 en 6)

- Betrek ook hier (**lokale**) **experten en/of VMM** en koppel terug naar de oorspronkelijke onderzoeksvraag.
- Vergelijk de **waargenomen verschillen** tussen de sensoren met de **waargenomen onzekerheid** (meetfout) van de sensoren om uit te maken of de verschillen effectief te wijten zijn aan de maatregel/locatie (en niet aan sensorruis).
- Indien je lokale effecten wil kwantificeren:
 - Gebruik de meetgegevens op de achtergrondlocatie om te normaliseren/corrigeren voor de achtergronddynamiek
- Evalueer hoe representatief de waargenomen effecten zijn (andere uren, dagen, seizoenen,...) rekening houdend met de ruimtelijke en temporele variatie in luchtkwaliteit.

COMMUNICATIE (H5)

- Test de **assumpties van de resultaten** voor een grootschalige communicatiecampagne om op voorhand na te gaan of je communicatie wel doeltreffend zal zijn
- Focus op de **doelgroep, assumpties van de resultaten** en **doel van de communicatiecampagne** (vb gedragsverandering)
- Afhankelijk van de vraagstelling heeft ruwe data nog verwerking nodig (vb normalisatie ten opzichte van achtergrondlocatie) en kan mogelijk tot misinformatie leiden.
- Overweeg verschillende communicatieconcepten:
 - Visualisatie app
 - Visualisatie bord
 - Spel vervoerskeuze
 - Knelpunt overzicht
 - Route dashboard
 - ...



Figuur 1 Blauwdruk voor een gemeentelijk sensornetwerk. Scoping (oranje) en best practices (groen) op basis van de ervaringen uit dit project worden aangegeven per processtap.

Aanvullend lijsten we hieronder de bestaande tools en kennisplatformen op die kunnen gebruikt worden in elk van de processtappen uit Figuur 1:



[VAQUUMS SCOPING ROADMAP](#)

Scoping/brainstorm Roadmap ontwikkeld in het VAQUUMS project

Samen voor Zuivere Lucht -
INSPIRATIE

Inspirerende voorbeelden, acties en tools



[SELECTIETOOL SENSOREN](#)

Selectietool/inventaris sensoren (EMIS)

[OVERZICHT MEETTECHNIEKEN](#)

Dataportaal/inspiratie luchtkwaliteitsmetingen

DATAKWALITEIT

- [AIRLAB](#)
- [AQ-SPEC](#)
- [VAQUUMS](#)

Onafhankelijke evaluatieplatformen van datakwaliteit van sensor(box)en



[VMM/LOKALE EXPERTEN](#)

VMM aanspreekpunt voor lokale overheden rond het meten van luchtkwaliteit en het uitzetten van kwalitatieve beleidsplannen



[VMM/LOKALE EXPERTEN](#)

VMM aanspreekpunt voor lokale overheden rond het meten van luchtkwaliteit en het uitzetten van kwalitatieve beleidsplannen



[VAQUUMS SCOPING ROADMAP](#)

Scoping/brainstorm Roadmap ontwikkeld in het VAQUUMS project

HOOFDSTUK 2. AANLEIDING

De aanleiding van deze blauwdruk voor lokale overheden is een groeiende bezorgdheid van zowel burgers als beleidsmakers om de luchtkwaliteit in hun gemeente. Om een gefundeerd beleid te kunnen voeren, de gewenste acties te kunnen nemen, en bovendien de burgers te sensibiliseren en informeren zijn metingen van de luchtkwaliteit noodzakelijk. De Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) beoordeelt de luchtkwaliteit op basis van de meetgegevens van hun meetnet. Helaas is het aantal meetstations beperkt en is er niet in elke gemeente een meetstation beschikbaar.

Eerdere initiatieven zoals metingen uitgevoerd in een aantal van de deelnemende steden en gemeenten (Sint-Niklaas, Kampenhout,...) met AirQmap (VITO, www.airqmap.com) toonden aan dat er heel wat lokale verschillen zijn in luchtkwaliteit. Om een onderbouwd beleid te voeren zijn deze gegevens belangrijk. Met dit projectvoorstel wensen we invulling te geven aan deze concrete nood aan informatie over de luchtkwaliteit op het lokale niveau.

Een sensornetwerk gebaseerd op goedkopere sensoren voor luchtkwaliteitsmetingen biedt extra mogelijkheden die niet haalbaar zijn met dure toestellen. De laatste jaren is er heel wat ontwikkeling gebeurd op vlak van goedkopere sensoren voor luchtkwaliteitsmetingen en op het vlak van sensorintegratie in netwerken en IoT-toepassingen. Bij de meeste steden ontbreekt de expertise om de juiste sensoren te selecteren en te valideren, een sensornetwerk op te zetten en de data correct te interpreteren.

Een sensornetwerk voor luchtkwaliteit kan echter enkel kwalitatieve data aanleveren wanneer de juiste sensoren worden geselecteerd en via kalibratie de kwaliteit ervan kan worden gegarandeerd. Bovendien zijn er nog uitdagingen in verband met het opstellen en onderhoud van een sensornetwerk, de interpretatie en communicatie van de meetgegevens en de integratie in bestaande IoT systemen.

Daarom sloegen vijf Vlaamse gemeenten de handen in elkaar en dienden een projectaanvraag in binnen de oproep 'City of Things' (CoT) van het Vlaams Agentschap Innoveren & Ondernemen (VLAIO) met de titel "Gemeentelijk sensornetwerk voor luchtkwaliteitsmetingen". De doelstelling van dit project is om **noodzakelijke kennis** te verwerven om op een **wetenschappelijk onderbouwde manier** een **sensornetwerk voor luchtkwaliteitsmetingen** op te zetten op het **niveau van een gemeente**. Dit omvat kennis over functionele vereisten van een sensornetwerk, overzicht van commercieel beschikbare sensoren, vereisten met betrekking tot netwerk, visualisatie en communicatie naar de burgers en een business case waarin alle te verwachten kosten van een sensornetwerk (aankoop, onderhoud, visualisatie, verwerking) worden opgelijst.

Tevens bekeken we hoe steden en gemeenten de opgedane kennis kunnen gebruiken om hun beleid te voeren (wat te doen met metingen?, welke acties te nemen?). Er werden twee testcases uitgerold op basis waarvan adviezen kunnen geformuleerd worden op het vlak van technische haalbaarheid en bruikbaarheid van de resultaten. De resultaten en conclusies van de studies die in het kader van het project "Gemeentelijk sensornetwerk voor luchtkwaliteitsmetingen" werden uitgevoerd, worden - samen met resultaten uit studies gefinancierd in het kader van een Europees project bij VMM (LIFE VAQUUMs) – gebundeld in dit rapport.

Dit rapport omvat een synthese van:

- Een grootschalige bevraging van 79 Vlaamse steden en gemeenten
- Een co-design workshop met 7 burgers uit Schoten
- Een innovatrix workshop met VMM, Schoten, Sint-Niklaas, Kampenhout, Dilbeek en Oudenaarde
- Een VITO literatuurstudie over sensoren³
- Een IMEC rapport met netwerkvereisten⁴
- Een workshop met lokale overheden
- Aanbevelingen rond het gebruik van luchtkwaliteitssensoren van VAQUUMS²
- Aanbevelingen rond het gebruik van luchtkwaliteitssensoren van IMEC¹
- Twee concrete use cases waarin sensornetwerken werden uitgerold in Sint-Niklaas (VITO rapport 2021/HEALTH/R/2588) en Kampenhout (VITO rapport 2021/HEALTH/R/2589)
- Een evaluatierapport naar de haalbaarheid en gebruiksvriendelijkheid van deze pilootstudies vanuit een gebruikersperspectief (gemeente)⁵
- Een bevraging van de betrokken gemeentes naar hun ervaringen met betrekking tot sensornetwerken voor luchtkwaliteit

Al deze inzichten werden tenslotte gebundeld in een **blauwdruk voor een gemeentelijk sensornetwerk** (HOOFDSTUK 1), een praktische tool waar lokale besturen mee aan de slag kunnen.

De blauwdruk in HOOFDSTUK 1 probeert te differentiëren ten opzichte van voorgaande roadmaps door middel van praktische voorbeelden, concrete tools (vb. selectietool sensoren), learnings, take-aways uit stakeholder workshops en ervaringen uit 2 concrete pilootstudies met luchtkwaliteitssensoren in Sint-Niklaas en Kampenhout, beschreven in HOOFDSTUK 3 tot HOOFDSTUK 7.

Tot slot geven we in HOOFDSTUK 8 nog een olijsting van alle zaken die bevraagd moeten worden bij het opmaken van een bestek voor een sensornetwerk.

De blauwdruk kan dan ook gezien worden als een hands-on tool voor steden en gemeenten die met sensornetwerken aan de slag willen.

Tabel 1: Overzicht studies en rapporten gebruikt als input voor deze blauwdruk

REFERENTIE	KORTE REFERENTIE	DOEL
“Literatuurstudie, marktonderzoek en multi-criteria-analyse betreffende luchtkwaliteitssensoren en sensorboxen” Peters J. en Van Poppel M., 2020. 2020/HEALTH/R/2098	Literatuurstudie	<ul style="list-style-type: none"> - Overzicht bestaande sensoren en sensor-systemen - Beschikbare systemen op de markt - Hun performantie - kostprijs - Multi-criteria-analyse
Board of Innovation (BOI) Rapport: “Sensornetwerk voor luchtkwaliteitsmetingen: bevindingen workshops”, 2019	Workshop met steden en gemeenten	<ul style="list-style-type: none"> - Workshop met steden en gemeenten - In kaart brengen vereisten en toepassingen van een sensornetwerk
Stakeholdersconsultatie sensorbox luchtkwaliteitsmeting	Bevraging bij Vlaamse steden en gemeenten	<ul style="list-style-type: none"> - Noden, drijfveren en verwachtingen van stedelijke en gemeentelijke sensornetwerken
IMEC co-design workshop “VLAIO – Gemeentelijk Sensornetwerk Voor Luchtkwaliteitsmetingen”	Co-design workshop met 7 burgers uit schoten	<ul style="list-style-type: none"> - onderzoeken hoe burgers geïnformeerd willen worden over de meetresultaten van sensorboxen - inzicht in specifieke wensen en functionaliteiten van burgers ten aanzien van een platform om burgers te informeren rond luchtkwaliteitsmetingen
VAQUUMS “Roadmap on Air Quality Sensors”	Roadmap voor het gebruik van luchtkwaliteitssensoren	<ul style="list-style-type: none"> - Roadmap voor lokale overheden voor het opzetten van sensornetwerken luchtkwaliteit. - Brainstorm pakket/templates (PDF/Miro)
IMEC IDLab rapport: “IoT network comparison” Berghs, J. 17/12/2019	IoT netwerkrapport	<ul style="list-style-type: none"> - Beschrijving en specificaties van beschikbare IoT netwerk opties: WiFi, LoRaWAN, SigFox and NB-IoT
IMEC Livinglabs “Innovatrix Workshop: Gemeentelijk Sensornetwerk Voor Luchtkwaliteitsmetingen” 13/12/2018	Innovatrix workshop	<ul style="list-style-type: none"> - Scope, doelstellingen en belangrijkste onzekerheden van de pilootstudies identificeren
IMEC “Measuring & Modeling Air Quality in Smart Cities: Valorizing the results of multi-year research into air quality monitoring” Hofman J., Panzica La Manna V., Muylaert J.	Rapport rond gebruik van luchtkwaliteitssensoren en modellering in smart cities	<ul style="list-style-type: none"> - Potentieel en limitaties van luchtkwaliteitssensoren in slimme steden
EPA Air Sensor Toolbox	EPA portaal rond sensor data, performantie en interpretatie	<ul style="list-style-type: none"> - Richtlijnen rond het gebruik van luchtkwaliteitssensoren

		<ul style="list-style-type: none"> - Data kwaliteit - Data analyse en interpretatie
Rapport "City Of Things: Kampenhout use-case" Hofman J., Peters J., Van Poppel M., 2021. 2021/HEALTH/R/2589	Opzet en resultaten van de CoT pilotstudie in Kampenhout	<ul style="list-style-type: none"> - Opzet en analyse sensornetwerk rond Parkschool in Kampenhout
Rapport "Overzicht sensornetwerk Sint-Niklaas" Peters J., 2021. 2021/HEALTH/R/2588	Opzet en resultaten van de CoT pilotstudie in Sint-Niklaas	<ul style="list-style-type: none"> - Opzet en analyse van sensornetwerk rond Grote Markt in Sint-Niklaas
"Uitrollen van een sensornetwerk voor luchtkwaliteitsmetingen in 2 pilotprojecten en de bijhorende visualisatie van de meetresultaten: Globale analyse van de resultaten en beoordeling van de testopstelling" Peters J., Van Poppel M., Hofman J., Baeyens B., Van Laer J., Spruyt M., 2021. 2021/HEALTH/R/2590	Globale Analyse rapport	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluatie van testopstelling in pilotstudies (technische en praktische aspecten). vanuit het standpunt van steden en gemeenten.

HOOFDSTUK 3. DOEL & FUNCTIONELE VEREISTEN

3.1. OPZET

Het globale doel van het project is te komen tot een **concept van een sensornetwerk voor luchtkwaliteit op niveau van een gemeente**. Echter, de toepassing van een dergelijk netwerk kan zeer divers zijn en bijgevolg ook de vereisten. Zo wil Sint-Niklaas de effecten van het invoeren van een wijkcirculatieplan op de luchtkwaliteit monitoren. Kampenhout wil metingen doen ter hoogte van scholen en verzorgingscentra. Andere deelnemende gemeentes hebben nog andere toepassingen voor ogen. Tevens zijn er verschillende bronnen van luchtvervuiling (mobiliteit – industrie – havenactiviteiten – landbouw - infrastructuur) en niet al deze bronnen zijn voor elke gemeente relevant.

Het is dus belangrijk dat de betrokken gemeenten:

- een oplisting maken van de beoogde toepassingen (een soort wishlist);
- de functionele vereisten van het sensornetwerk definiëren in functie van de toepassing (bv. vormfactor sensorbox, energievoorziening, aantal sensorboxen, positionering, verplaatsbaar of niet, modulariteit, dashboard, onderhoud en kalibratie);
- gezamenlijk enige prioritering inzake toepassing van het sensornetwerk toekennen.

Voor dit werkpakket werd een **online bevraging van Vlaamse steden en gemeenten** georganiseerd om inzicht te verwerven in de gebruiksscenario's voor luchtkwaliteitssensoren op het niveau van steden en gemeenten. Daarnaast werd een **workshop met steden en gemeenten** georganiseerd door Board of Innovation (BOI) om een zo breed mogelijk gedragen beeld te kunnen vormen van de toepassingen die steden en gemeenten zien voor dergelijke sensornetwerken.

3.2. RESULTATEN ENQUÊTE

De online bevraging die verspreid werd onder Vlaamse steden en gemeenten bevatte vragen over:

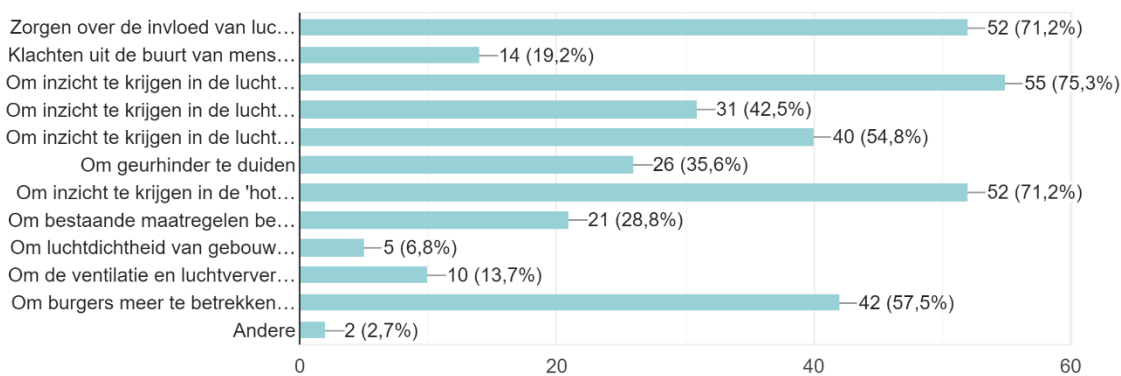
- Interesse naar luchtkwaliteitsmetingen
- Beoogde toepassing van sensornetwerken
- Belangrijkste oorzaken van luchtverontreiniging in die gemeente
- Locatie luchtmetingen
- Welke polluenten
- Aantal sensoren
- Risico's en uitdagingen
- Beschikbaar budget voor een sensorbox

In totaal werden 88 antwoorden geregistreerd uit 79 verschillende steden en gemeenten, waarvan 58% afkomstig van milieuambtenaren of omgevingsdeskundigen, 17% afkomstig van schepenen (mobiliteit/milieu/ruimtelijke ordening/jeugd/sport), 10% van duurzaamheidsambtenaren en 14% uit andere functies.

3.2.1. DRIJFVEREN

Van deze steden en gemeenten krijgt 65.5% jaarlijks **vragen om luchtmetingen** uit te voeren, terwijl 71% nog geen luchtmetingen in de gemeente uitvoert en **83% van de gemeenten effectief geïnteresseerd is om luchtkwaliteitsmetingen uit te voeren**. Uit deze bevraging lijkt met andere woorden toch een duidelijke nood aan (bijkomende) luchtkwaliteitsmetingen.

Wanneer we polsen naar de reden van hun interesse in het meten van luchtkwaliteit (Figuur 2) krijgt inzicht in **invloed van verkeer** op luchtkwaliteit (75%) de hoogste prioriteit, gevolgd door **invloed van luchtkwaliteit op gezondheid** (71%) en inzicht in **lokale "hotspots"** van luchtverontreiniging in de stad/gemeente (71%). Vervolgens geven ook velen (58%) aan dat luchtmetingen meer **burgers kunnen betrekken bij de problematiek van luchtverontreiniging**.



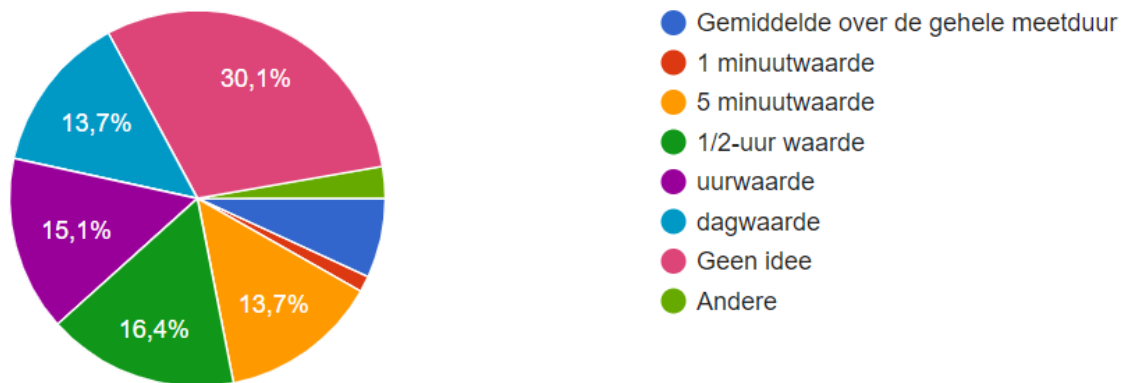
Figuur 2: Respons (73) drijfveren voor het meten van luchtkwaliteit

Als nadelen van bestaande luchtkwaliteitsmetingen worden de **grote afstand tot een beschikbaar meetstation** (52%), onvoldoende **beschikbaarheid luchtkwaliteitsdata** (43%) en **de hoge kostprijs** (38%) als voornaamste aangegeven.

3.2.2. MEETOPZET

De meeste gemeenten (64%) willen **luchtmetingen in de buitenlucht** uitvoeren terwijl 34% zou willen opteren voor een combinatie van zowel buiten- als binnenmetingen. 42% geeft bovendien een rechtstreekse interesse naar **mobiele metingen** aan terwijl 47% aangeeft misschien geïnteresseerd te zijn. Voor wat betreft de op te meten pollutanten geeft 88% fijn stof aan, gevolgd door organische (53%) en anorganische gassen (48%). Ongeveer de helft van de participanten zou hierbij ook verkeersintensiteit (51%) en geluid (56%) als parameter willen opmeten.

De verkregen resultaten over de benodigde **tijdsresolutie** variëren zeer sterk van 5 minuten tot dagelijkse meetresolutie (Figuur 3). Bovendien geeft ook 30% aan geen idee te hebben over de benodigde meetresolutie. Ook voor wat betreft het **aantal sensoren** geeft de meerderheid van de steden en gemeenten (55%) aan geen idee te hebben, terwijl de overige respondenten eerder een beperkt aantal sensoren (18%: 1-5, 12%: 6-10) lijken te verkiezen. Het meetopzet (type pollutanten, tijds/ruimtelijke resolutie) wordt bepaald door de onderzoeksvraag en zal dus inderdaad sterk variëren met de beoogde sensortoepassing. Daarnaast kunnen we een nood aan begeleiding van steden en gemeenten omtrent een goed meetopzet afleiden uit de verhoogde onzekerheden in de antwoorden op deze vragen.



Figuur 3: Respons (73) minimale benodigde tijdsresolutie luchtmetingen

3.2.3. UITDAGINGEN

Als grootste uitdagingen in het gebruik van sensornetwerken voor luchtkwaliteit geven steden en gemeenten de **interpretatie** van de metingen en **toetsing aan de normering** aan (70%), gevolgd door de **betrouwbaarheid** van de meetresultaten (63%) en kennis over het **gebruik en onderhoud** van sensoren (49%) aan.

Qua kostprijs kregen we veel minder feedback (16 antwoorden) en geven de meeste steden en gemeenten (50%) aan geen idee te hebben van de toelaatbare kost van een sensorbox, terwijl 5 respondenten aangeven dat de box tussen 0-500 mag kosten. De meeste respondenten (42%) zouden als gebruiksformule opteren voor een **deelsysteem met andere steden en gemeenten**, terwijl 24% zelf zou aankopen voor permanent gebruik en 19% zou opteren voor een huursysteem.

3.3. WORKSHOP LOKALE OVERHEDEN

Uitgangspunt van de workshop was om eerst de vraagstelling helder te krijgen om daarna over te gaan tot het vastleggen van de functionele vereisten. Daarom werden voor de workshop eerst enkele concrete begrippen gedefinieerd om te bepalen wat en waarom gemeten moet worden, hoe meetresultaten naar de burger moeten worden gecommuniceerd en hoe de uitrol van een sensornetwerk stapsgewijs moet worden uitgewerkt (Figuur 4).



Figuur 4: Stapsgewijze vereisten voor het bekomen van een sensornetwerk luchtkwaliteit

3.3.1. ECOSYSTEEM

Bij het opmaken van een sensornetwerk is het van belang om goed te definiëren wie de **betrokken stakeholders** zijn, **wie je wil bereiken** en wat het **doel van de campagne** is. Dit zogenaamde ecosysteem bestaat uit gebruikers van het sensornetwerk, de doelgroep en eventuele begunstigde partijen. De **gebruikers** maken effectief gebruik van het sensornetwerk, terwijl de impact/maatregelen van de metingen (vb gedragsverandering) bij de **doelgroep** wordt verwacht. Daarnaast zijn er **begunstigde partijen** die ook belang hebben bij het sensornetwerk en/of de verzamelde data. Zowel de gebruiker en doelgroep (die ook dezelfde kunnen zijn) zijn cruciaal om tot een onderzoeksvraag en meetopzet te komen.

Gebruiker en/of doelgroep

Naar gelang de betrokken gebruiker of doelgroep kunnen de perspectieven en noden van een sensornetwerk verschillen. Het is dan ook belangrijk om je in te leven in de noden van deze gebruikers. Tijdens de workshop lokale overheden werden 5 verschillende persona's uitgewerkt:

- Milieuambtenaar
- Jonge moeder (burger)
- Astmapatiënt (burger)
- Bewuste school (school)
- Onbewuste school (school)

De perspectieven van 3 geselecteerde persona's (milieuambtenaar, jonge moeder en bewuste school) werden vervolgens verder uitgewerkt vanuit "pains", "gains" en "jobs to be done" (Figuur 5).

Milieuambtenaar PERSONA

- > PAINS
 - **Burger niet kunnen helpen**
 - Probleem helder krijgen
 - Onvoldoende info voor burger
 - Klachten over gezondheid
 - Ongestructureerde info
- > GAINS
 - **Maatregelen met grote impact**
 - Problematiek kunnen duiden
 - Meer betrokkenheid buurt
 - Meer detail
- > Jobs to be done
 - **Draagvlak voor maatregelen creëren**
 - De juiste maatregel nemen

Jonge moeder PERSONA

- > PAINS
 - **Gezondheid kinderen**
 - Hoeveelheid verkeer
- > GAINS
 - **Gezonde kinderen**
 - Verbeterde levenskwaliteit
- > Jobs to be done
 - **Zichzelf en kinderen veilig en gezond verplaatsen, al dan niet met de fiets**

Bewuste school PERSONA

- > PAINS
 - **Ondersteuning gedragswijziging door alternatieven**
 - Bereiken van ouders
 - Geen ondersteuning v/d stad
 - Gebrek aan infrastructuur
- > GAINS
 - **Dagdagelijkse gevolgen**
 - Bewustzijn leerlingen
 - Welbevinden leerkrachten
 - Duurzame mobiliteit
 - Verhoogde aandacht
- > Jobs to be done
 - **Leerlingen -> gedragswijziging**
 - Continu sensibilisering
 - Motiveren van de leerkrachten
 - Eigen acties bedenken

Figuur 5 Perspectieven van 3 verschillende gebruikers (persona) van sensordata

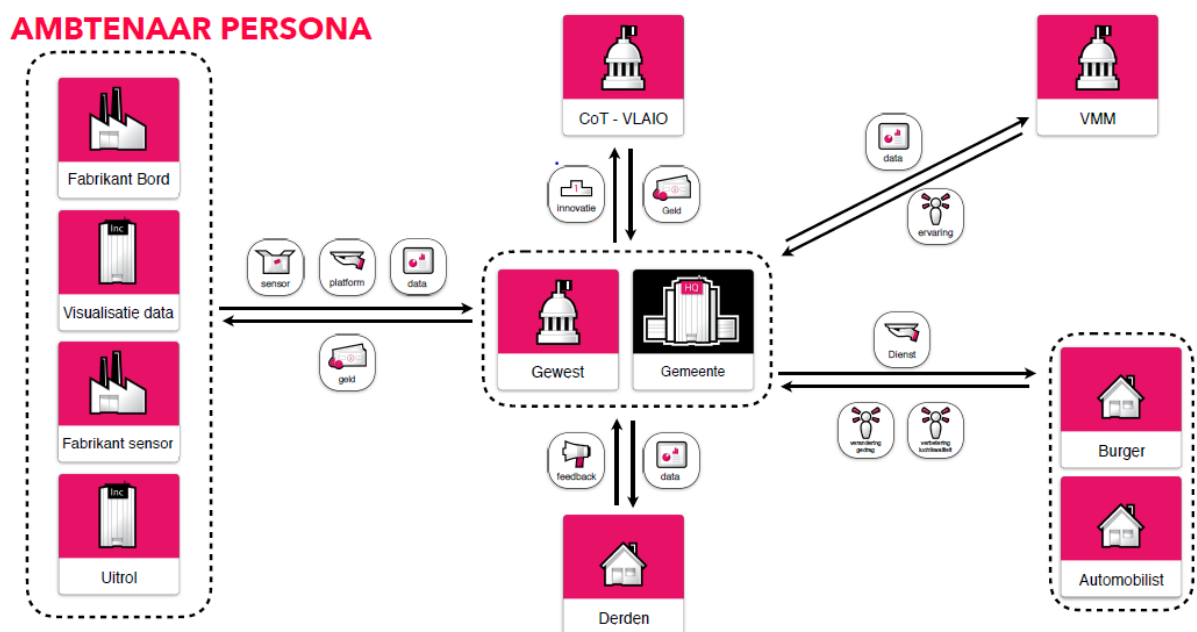
De communicatie en visualisatie van de resultaten moet eveneens worden afgestemd op de doelgroep (HOOFDSTUK 6).

Begunstigden

Bij het opmaken van een sensornetwerk kan het bovendien van belang zijn om uit te maken wie de **breder begunstigde stakeholders** van je sensornetwerk kunnen zijn. Zowel met als doel het breder en cross-disciplinair toepasbaar maken van de meetresultaten (vb betrekken partijen rond

mobiliteit, klimaat, geluid,...), als het financieel haalbaarder (HOOFDSTUK 8) maken van het beoogde sensornetwerk (vb IoT partijen). Vanuit de stakeholder bevraging en co-design workshop lijkt er alleszins nood aan een meer interdisciplinaire aanpak van milieuproblemen en vragen gebruikers/doelgroepen naar een eenduidig informatieplatform met algemene duiding. Ook in de [VAQUUMS sensor roadmap](#) (6: Bonus Quest) wordt het belang van begunstigde stakeholders toegelicht, niet als directe gebruiker, maar als co-creator of co-financierder van het uiteindelijke sensornetwerk.

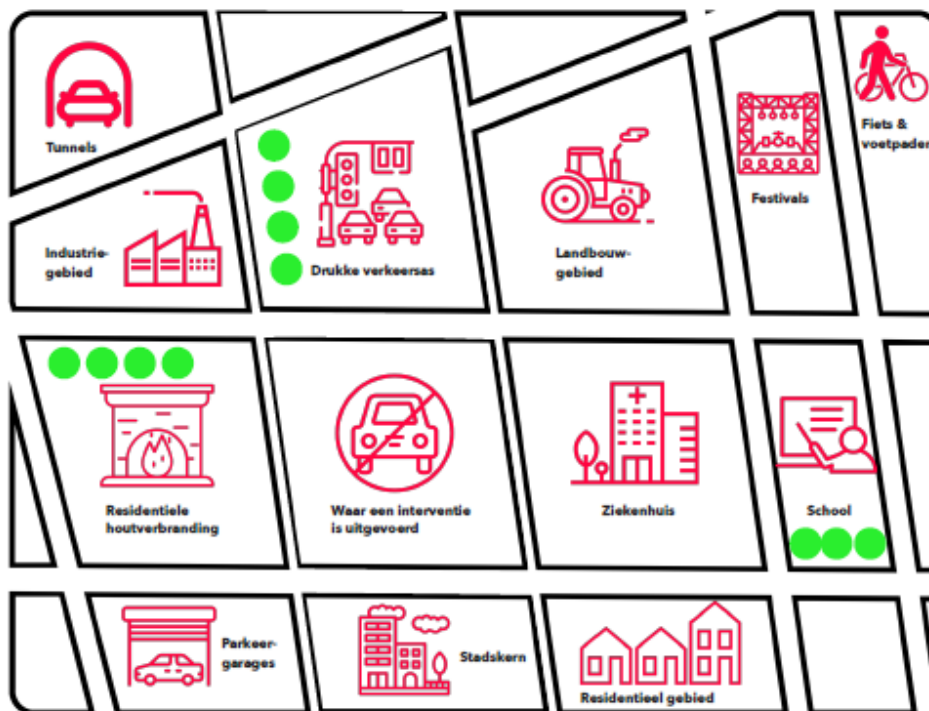
Voor het bepalen van de betrokken stakeholders en het doelpubliek werd in de workshop lokale overheden een ecosysteem opgemaakt. Voor de gekozen zones werden de interacties tussen de verschillende stakeholders in de opzet van het ecosysteem bepaald. Een uitgewerkt ecosysteem kan hieronder teruggevonden worden voor de inzet van een vast sensornetwerk voor de zone “druk verkeer” bij de “milieuambtenaar” (Figuur 6).



Figuur 6 Ecosysteem van betrokken stakeholders bij een vast sensornetwerk voor zone “druk verkeer” bij persona “milieuambtenaar”..

3.3.2. ONDERZOEKSVRAAG

Vervolgens werd in functie van de beschouwde gebruiker en doelgroep de meest relevante geaffecteerde zone gedefinieerd voor de toepassing van een sensornetwerk. Voor de milieuambtenaar primeerden **houtverbranding**, **drukke verkeersassen** en **scholen**, voor burgers dan weer **verkeerskruispunten** en **route naar school (fiets en voetpaden)** en voor de scholen **route naar school** en **buiten vs binnen**. Voor alle gebruikers (persona) lijken toepassingsgebieden voor sensoren dus vooral te focussen op drukke verkeersassen en blootstelling rond scholen. Daarnaast is er voor milieuambtenaren een duidelijke bijkomende focus naar houtverbranding. Niet verwonderlijk aangezien houtverbranding verantwoordelijk is voor respectievelijk 43% en 31% van onze PM_{2.5} en PM₁₀ (fijn stof) uitstoot⁶. De focus op verkeer, hotspots en scholen kwam eerder ook al naar voren uit de grootschalige bevraging van steden en gemeenten.



Figuur 7 Beoogde toepassingen voor sensornetwerken. Groene bolletjes geven selecties van milieuambtenaren tijdens workshop weer.

In de [VAQUUMS roadmap](#)² wordt deze initiële fase vanuit design thinking gedefinieerd als inleving (“emphatise”). De brainstorm processen in deze roadmap zijn vrij beschikbaar als [MIRO of PDF templates](#) en kunnen steden en gemeenten helpen bij het identificeren van de stakeholders en definiëren van de onderzoeksvraag.

3.3.3. MEETOPZET

Om vervolgens per geïmpacteerde zone te bepalen welk meetopzet nodig is werden volgende vereisten geëvalueerd:

- Meetomgeving (binnen vs buitenlucht)?
- Mobiele vs vaste meetlocaties?
- Beschikbaarheid resultaten (5 min - >week)?
- Visualisatie resultaten (actuele waarden, kaart, tijdreeks)?
- Benodigde tijdsresolutie (1 seconde - 24 uur gemiddelde)?
- Toelaatbare afwijking/nauwkeurigheid meting (<10% - >50%)?
- Welke pollutanten (PM_{2.5}, PM₁₀, Roet, CO, CO₂, O₃, NO, NO₂, SO₂, CH₄, Pollen)?
- Hoeveel meetpunten benodigd (1 - > 50)?

Per geïmpacteerde zone werd het meetopzet (zonekaarten) uitgewerkt met specifieke vereisten van het sensornetwerk (vb in Figuur 8). In het meetopzet wordt het **doelpubliek** gedefinieerd, de **problematiek** en **hypothese**, beoogde **polluenten**, aantal **meetlocaties**, **meetomgeving** (binnen/buitenlucht) en **type meting** (vast/mobiel), **meetresolutie**, **beschikbaarheid** van de data, **visualisatie** vereisten en **toegelaten afwijking** op de meting. Op basis van de functionele vereisten van het meetopzet kan dan weer de sensorselectie (Hoofdstuk 3) gebeuren.



Figuur 8: Vereisten van een sensornetwerk voor de geaffecteerde zones “druk verkeer”.

3.4. CONCLUSIES DOEL & FUNCTIONELE VEREISTEN

Op basis van de online bevraging van 79 steden en gemeenten en de BOI workshops komen enkele belangrijke zaken naar voor:

- Er is een gedegen interesse van steden en gemeenten in **bijkomende luchtmetingen**
- Vooral de invloed van **lokaal verkeer** en **potentiële hotspots** op de gezondheid lijken focusgebieden voor bijkomende metingen. Bovendien is het ook een manier om de **burger te betrekken** bij de problematiek rond luchtverontreiniging (sensibilisering/begrip voor maatregelen/gedragsverandering).
- Interesse gaat voornamelijk uit naar metingen van **stofdeeltjes en gassen in buitenlucht** (zowel vast als mobiel).
- Grootste uitdagingen voor steden en gemeenten liggen in de **interpretatie** van de meetgegevens en betrouwbaarheid van de meetresultaten.
- Steden en gemeenten hebben ook nood aan ondersteuning om hun (onderzoeks)vraag om te zetten in een meetplan en vereisten van de meetinstrumenten
- Het is van belang om reeds in de beginfase doelen en hypotheses te formuleren om de vereisten van het meetopzet te kunnen definiëren (zie ook [LIFE VAQUUMS guidelines](#))
- Op basis van de hypothese/onderzoeksvraag en de beoogde doelgroep kan het meetopzet en de meest optimale sensor/sensorsysteem bepaald worden.

De functionele vereisten komen voort uit bovenstaande oefening en moeten inzicht geven over:

- Geaffecteerde zone → meetomgeving/meetwijze → relevante polluenten
- Type sensor:
 - Prijs
 - Aantal gemeten polluenten
 - Plug & play
 - Benodigde technische kennis
 - Terugkerende kosten
 - Levensduur sensor
 - Temporele resolutie meting
 - Datakwaliteit meting

HOOFDSTUK 4. BESCHIKBARE SENSOREN

4.1. CONTEXT

Momenteel wordt de luchtkwaliteit in Vlaanderen opgemeten door een netwerk aan automatische referentiestationen (meer dan 150 stations met een gemiddelde kost van +/- 150 000 euro/station) en met een strikt gereguleerd kwaliteitsborgingssysteem met betrekking tot datakwaliteit en meetfrequentie. Deze meetgegevens zijn in (near) [real-time beschikbaar](#) op een uurlijkse meetresolutie. Naast deze automatische metingen is er ook een semi-automatisch netwerk waarbij dagelijkse, wekelijkse of maandelijkse samples worden verzameld en geanalyseerd in het labo (vb. passieve NO₂ meetbuisjes, stoffilters bemonsterd met aangezogen omgevingslucht (Leckel/Derenda)). Naast de beschikbare automatische en semi-automatische meetnetwerken worden luchtkwaliteitsmodellen toegepast om de luchtkwaliteit op plekken waar niet gemeten wordt te voorspellen, luchtkwaliteit in de nabije toekomst te voorspellen en scenario's (vb. beleidsmaatregelen) door te rekenen¹.

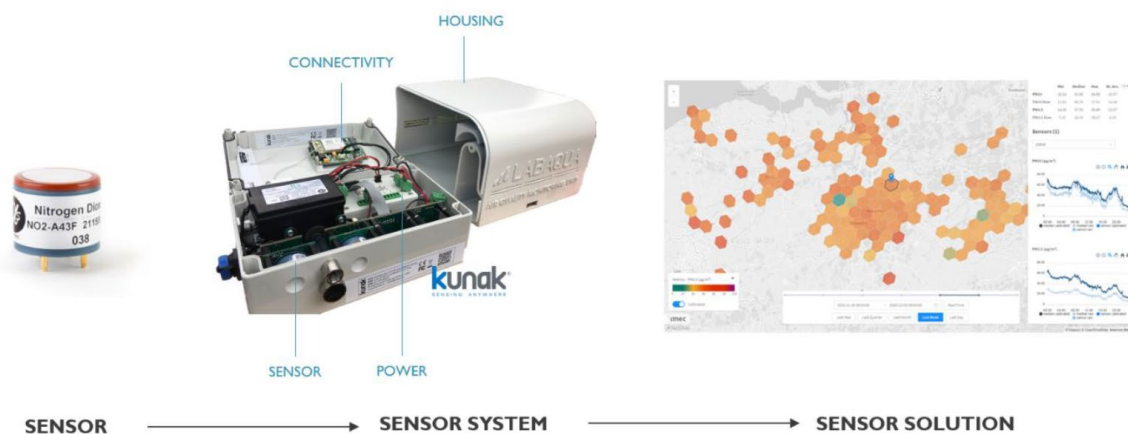
Recente ontwikkelingen in sensor- en IoT-technologie resulteerden in een breed gamma aan beschikbare stof- en gassensoren die het vandaag mogelijk maken om op een hogere ruimtelijke en temporele resolutie te gaan meten en dus meer representatieve luchtkwaliteitsdata te verkrijgen. Het is voor gemeenten dan ook niet evident om een overzicht te maken van de juiste sensoren voor de beoogde toepassingen. In dit werkpakket wordt op basis van een marktstudie en een analyse van resultaten uit gespecialiseerde literatuur een overzicht en evaluatie gemaakt van commercieel beschikbare sensoren en sensorsystemen.

Wanneer we een ~30 000 euro referentie/equivalente monitor vergelijken met een ~20-600 euro low-cost sensor zijn er toch enkele belangrijke verschillen om rekening mee te houden:

- **Meetprincipe:** Terwijl het meetprincipe van stofsensoren vergelijkbaar is met het meetprincipe van sommige equivalente monitoren (optische deeltjestelling/scattering op basis van laser/LED) maar met lagere kwaliteit van optiek/lichtbron, werken gassensoren op basis van een ander meetprincipe; v.b. elektrochemische sensoren die een chemische reactie in een vloeistof (elektrolyt) gaan omzetten in een kwantificeerbare spanning (mV) of stroom (nA) en metaaloxide sensoren waarbij het omgevingsgas reageert met halfgeleidermateriaal wat resulteert in vrije elektronen en een verandering in weerstand.
- **Gevoeligheid voor temperatuur/luchtvochtigheid:** zowel stofsensoren als gassensoren zijn gevoelig aan temperatuur en luchtvochtigheid, terwijl referentietoestellen de lucht conditioneren (op vaste temp/RH brengen) voor de meting.
- **Detectierange:** Eerst en vooral is het van belang om na te gaan of de beoogde sensor in staat is om representatieve (binnen/buitenlucht)concentraties op te meten. Gassensoren meten vaak in de ppm range terwijl typische omgevingsconcentraties 0-100 ppb bedragen (1 ppm = 1 000 ppb). Stofsensoren beschikken niet over deeltjesgrootte begrenzers zoals impactoren of cyclonen om de bovengrens te bepalen. Daarnaast beginnen ze typisch deeltjes vanaf een diameter van 0.3 µm te meten terwijl de detectielimiet voor referentietoestellen lager (0.18 µm) kan liggen (betere optiek/lichtbron).
- **Drift:** sensoren kunnen een gradueel veranderende respons doorheen de tijd vertonen doordat stofsensoren intern bevuild geraken en gassensoren uitdrogen.

Het is belangrijk om een onderscheid te maken tussen de sensor, het sensorsysteem (sensor unit of sensorbox) en de sensor solution. De sensor is de hardware component die de effectieve meting uitvoert. De performantie van een **low-cost sensor** zal bepaald worden door een combinatie aan meetprincipe, sensor design en resistentie tegen gevoeligheden. Een sensor wordt vaak ingebouwd in een **sensorsysteem** met geoptimaliseerde behuizing, communicatieprotocol (LoRa, wifi, NBloT,...) en stroomvoorziening (batterij, netstroom, zonnepaneel,...) om functioneel te zijn voor de beoogde onderzoeksvraag. Wanneer we tot slot een volledige functionele omgeving hebben met sensor(en), online opvolging/dashboard, kalibratie en/of kwaliteitsmonitoring kunnen we spreken over een **sensor solution**.

De uiteindelijke sensorperformantie is dan ook een combinatie van intrinsieke sensorperformantie, toegepaste hardware in de sensor unit (vb impact behuizing op gemeten pollutantconcentraties) en data processing in de sensor solution (kalibratie/kwaliteitscontrole). Deze sensor performantie wordt vaak getest in labo en/of veldomstandigheden ⁷⁻⁹.



Figuur 9: Verschil tussen sensor, sensor unit/systeem en sensor solution

Voor een optimale sensorselectie moet dan ook volgende denkoefening gemaakt worden:

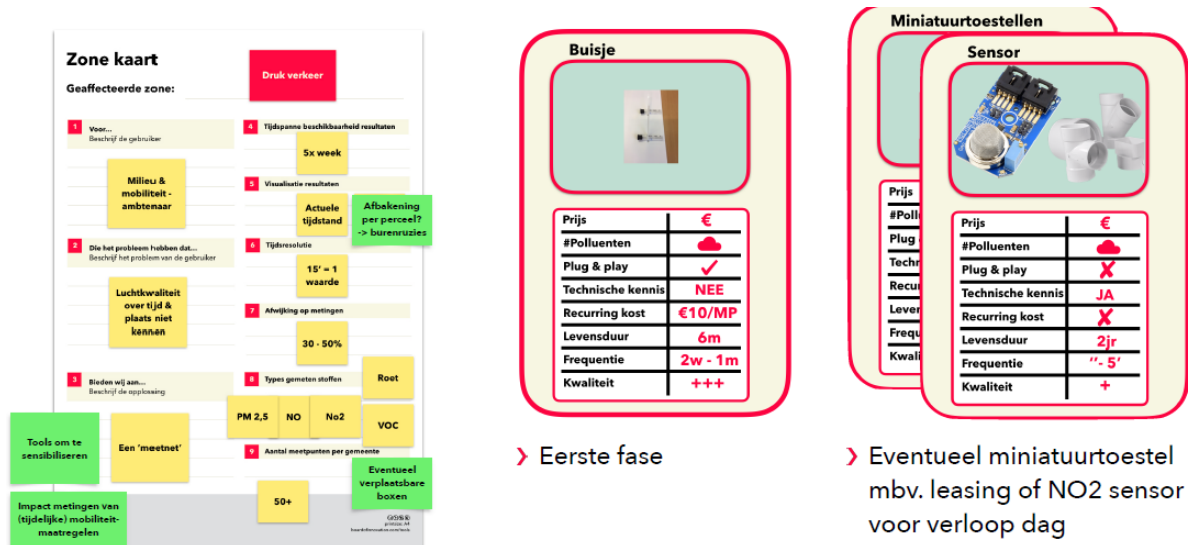
- Voldoet de sensor aan de vooropgestelde functionele vereisten gedefinieerd in Hoofdstuk 2 (onderzoeksvraag/geaffecteerde zone, pollutanten, meetresolutie, hardware, power)?
- Welke mate van dataverwerking/visualisatie, plug-and-play heb ik nodig?
- Zijn meerdere commerciële oplossingen beschikbaar?
- Zoja, kunnen deze vergeleken worden qua specificaties en datakwaliteit?

Bekijk hiervoor de vooropgestelde functionele vereisten met de specificaties van de fabrikant van de beoogde sensor of sensorbox en vergelijk met andere beschikbare sensor(box)en. Raadpleeg onafhankelijke testinitiatieven (zie §4.2) om een idee te hebben van de datakwaliteit.

4.2. WORKSHOP LOKALE OVERHEDEN

Na het definiëren van de functionele vereisten van het meetnetwerk (§3.3) werd tijdens de BOI workshop een overzicht gegeven van verschillende types metingen en hun karakteristieken (passieve meetbuisjes, sensoren, miniatuurtoestellen, referentiestation). Vervolgens werd per meetopzet de ideale sensor (of combinatie van sensoren) gezocht om aan het beoogde meetopzet te voldoen (Figuur 10). Volgende sensor karakteristieken werden beschouwd bij deze oefening:

- Prijs
- Aantal gemeten pollutanten
- Plug & play
- Benodigde technische kennis
- Terugkerende kosten
- Levensduur sensor
- Temporele resolutie meting
- Datakwaliteit meting



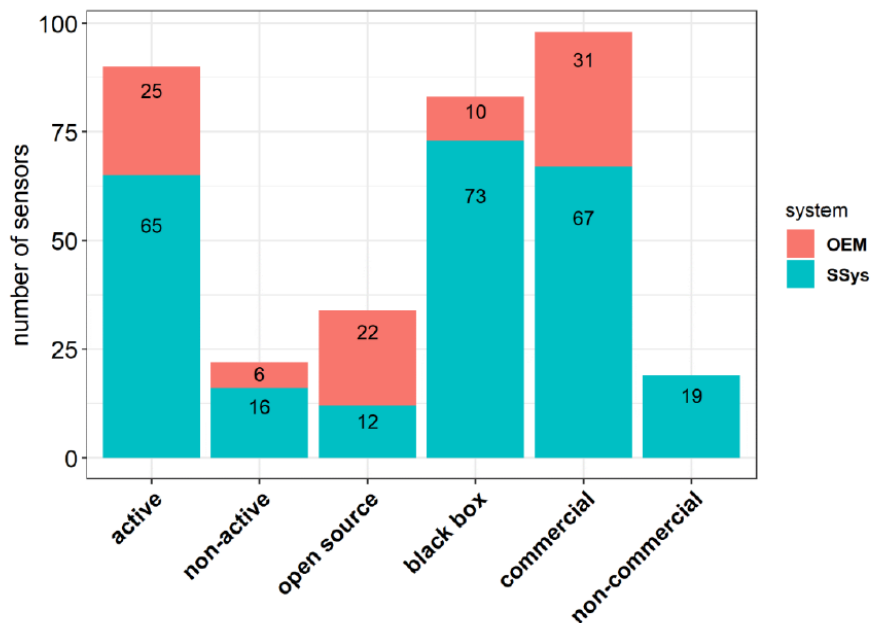
Figuur 10: Selectie van optimale sensoren (buisje, miniatuurtoestel, sensor) bij het meetopzet druk verkeer

Zoals uit Figuur 10 duidelijk wordt kan zowel gekozen worden voor 1 meting (vb meetbuisjes: goedkoop/breed inzetbaar/verkennde metingen) als een combinatie aan meetprincipes (vb meetbuisjes + sensor: dagverloop/hoge resolutie/real-time). Vergeet ook niet dat het bestaande referentiemetnet en luchtkwaliteitsmodellering al interessante inzichten of referentielocaties voor de beoogde vraagstelling kan opleveren.

4.3. MARKTANALYSE, LITERAATUURSTUDIE EN MULTICRITERIA-ANALYSE

Hoewel er vandaag nog geen officieel validatieprotocol bestaat (momenteel in ontwikkeling door CEN WG42 (EU) en EPA (VS)), zijn er nationaal en internationaal lopende initiatieven die via testprotocols inzichten verwerven in de datakwaliteit van sensorboxen in labo- en/of veldomstandigheden. Enkele voorbeelden hiervan zijn het [Air Quality Index Project](#), RIVM [Samen meten Platform](#), South Coast Air Quality Management District [AQ-SPEC](#), Airparif AIRLAB [Microsensor Challenge](#), US EPA [Air Sensor Toolbox](#), LIFE [VAQUUMS](#) project,... Voorlopig worden de testen en rapportering van AQ-SPEC als meest bruikbaar ervaren om de kwaliteit van metingen te beoordelen omdat zij relevante parameters kwantitatief op een vrij uniforme manier weergeven. Daarnaast bestaan er talloze artikelen waarin de performantie van low-cost sensoren onder labo- of veldcondities worden getest.

In een marktanalyse en literatuurstudie werd in oktober 2019 een overzicht opgemaakt van 89 sensorsystemen (sensorbox) en hun specificaties³. Daarnaast werden ook specificaties voor 92 verschillende sensoren (32 NO₂ sensoren, 20 O₃ sensoren en 40 PM sensoren) opgesteld. De belangrijkste sensorfabrikanten zijn (o.a.) Alphasense, Beijing Plantower, CitiTech, Euro-gas, Shinyei, Samyoung, Nova Fitness en Winsen.



Figuur 11: Overzicht van sensoren (OEM) en sensorsystemen(SSys) ifv aantal criteria: beschikbaarheid (active/non-active), kalibratiemodel (open source of black box), commercieel beschikbaar of niet (overgenomen uit Karagulian et al. ¹⁰).

Op basis van het literatuuronderzoek werden tabellen opgesteld waarin technische specificaties en de kwaliteitsbeoordeling van een groot aantal sensorboxen is opgenomen. Uit literatuuronderzoek blijkt dat er vaak een vrij grote range is in gerapporteerde kwaliteitskenmerken voor eenzelfde sensor(box). Bovendien kan de gerapporteerde performantie afhangen van de testcondities, die voor de verschillende sensorboxen (onder veldcondities) niet altijd dezelfde zijn. Ook de parameters die gebruikt worden om kwaliteit van sensordata uit te drukken kunnen verschillen; de meest gerapporteerde parameter om de kwaliteit van sensormetingen weer te geven in de literatuur is de overeenkomst tussen sensordata met referentiemetingen uitgedrukt als determinatiecoëfficiënt (R^2) en eventueel helling en intercept van de regressielijn. Daarnaast komen ook volgende parameters voor: correlatiecoëfficiënt (r), mean absolute error (MAE), root mean squared error (RMSE),...

In de overzichtstabel *evaluatie_sensorboxen.xlsx* (bijlage literatuurstudie³) worden testresultaten op basis van simultane outdoor metingen met sensorbox en referentie instrumenten weergegeven. Volgende resultaten werden hierin opgesteld voor de pollutanten NO₂, O₃ en PM_{2.5}³:

	kolom nr	kolom hoofding	
	1	naam	
	2	leverancier	
	3	sensor principe	meetprincipe
	4	sensor	

	5	testen uitgevoerd door	
info testset-up (outdoor)	6	type locatie	
	7	aantal sensorboxen	aantal boxen opgenomen in de test
	8	meetfrequentie	
	9	testrange	concentratiebereik
	10	duur	
	11	data coverage	volledigheid dataset
	12	referentie monitor	welke monitor
	13	tijdsresolutie vergelijking	
vergelijking met referentie	14	intercept	van lineaire regressie van sensor tov. Referentie metingen
	15	rico	
	16	R ²	
	17	correctiemodel (j/n)	
	18	parameters	
inter-sensor variabiliteit	19	R ²	
	20	afwijking	
	21	aantal	

Enkele conclusies zijn dat:

- Voor NO₂
 - De R² tussen 0 en 0.85 ligt
 - Grote verschillen
 - Intercept en richtingscoëfficiënt verschillen frequent van (0, 1), kalibratie nodig
- Voor O₃
 - De R² tussen 0 en 0.98 ligt
 - R² meestal > 0.7; verschillen tussen sensorboxen is kleiner
 - Intercept en richtingscoëfficiënt verschillen frequent van (0, 1), kalibratie nodig
- Voor PM_{2,5}
 - De R² tussen 0,26 en 0.99 ligt
 - R² meestal > 0.7; verschillen tussen sensorboxen kleiner
 - Intercept en richtingscoëfficiënt verschillen frequent van (0, 1), kalibratie nodig

Vervolgens werd in 2019 een gedetailleerde marktbevraging georganiseerd over sensor specificaties, werking, data en kost bij 14 commerciële sensorleveranciers op basis van de het overzichtartikel van Karagulian et al. (2019) en de AQUILA vergelijking die werd gecoördineerd door JRC. Samenvattende resultaten van deze bevraging kunnen worden teruggevonden in Tabel 2.

Tabel 2 Samenvattende resultaten van de marktbevraging bij 14 sensorfabrikanten (uitgevoerd in 2019)

	Polluenten			Plug and play	Data		Kostprijs* (kEUR = 1000 EUR)		Stroom	
	NO ₂	O ₃	PM _{2,5}		Draadloze transmissie	Visualisatie	Aankoop sensorbox	Netwerk 3 sensorboxen	netstroom	zonnepaneel
AQT410/420	+	+	+	+	+	+	5 kEUR	20 kEUR	+	-
AQMesh	+	+	+	+	+	+	3-10 kEUR	18 kEUR	+	+
Kunak sensor box	+	+	+	+	+	+	3-7 kEUR	15-25 kEUR	+	+
Airsenseur	+	+	+	-	+	+	2,5kEUR	7,5 kEUR	+	-
AQY	+	+	+	+	+	+	3,5 kEUR	12 kEUR	+	+
Cairnet	+	+	+	+	+	+	6,6 kEUR	20 kEUR	+	+
POM	-	+	-	+	-	+	/	/	-	-
Praxis	+	+	+	+	+	+	5 kEUR	15 kEUR	+	-
AirVeraCity	+	+	+	+	+	+	10 kEUR	25 kEUR	?	?
PAII	-	-	+	+	+	+	200 EUR	600 EUR	+	-
PATS+	-	-	+	+	-	+	500 EUR	1,6 kEUR		-
MetOne (E-sampler)	-	-	+	+	+	+	5 kEUR	15 kEUR	+	+
SCI - 608	+	+	+	+	+	+	3,3 kEUR	20 kEUR	+	+
Airly	+	+	+	+	+	+	350 EUR**	1,2 kEUR**	+	+

* dit is de kostprijs opgegeven op ogenblik van de bevraging (2019) en kan onderhevig zijn aan wijzigingen

** dit is de kostprijs voor huur van de sensorbox voor 12 maanden. Kostprijs voor aankoop was 1400 euro per stuk (inclusief subscription dataplatform)

Wat opvalt is dat de prijs van een netwerk van 3 sensorboxen sterk varieert van 600 tot 25000 euro.

Tenslotte werd een multicriteria-analyse (MCA) uitgevoerd met als doel de verschillende criteria die belangrijk zijn bij de keuze van de sensor of sensorbox te kunnen afwegen. Uiteraard hangt de manier waarop verschillende criteria tegenover elkaar worden afgewogen en het gewicht dat aan elk van deze criteria gegeven wordt af van de beoogde toepassing. Bovendien kan er voor criteria een wisselwerking bestaan: goedkopere sensoren die minder nauwkeurig zijn of minder gebruiksvriendelijk.

Bij de MCA stellen we voor om onderscheid te maken tussen **exclusie-criteria** en **differentiërende criteria**. De eerste zijn voorwaarden waaraan strikt voldaan moet zijn (vb aanwezigheid temp/RH sensor, open data principe). De differentiërende criteria kunnen een verschillend gewicht hebben in de beoordeling afhankelijk van de toepassing. In de literatuur zijn er al MCA te vinden ^{11, 12}, we baseerden ons hierop om een eigen analyse te maken ³.

De MCA houdt ook rekening met de beoogde toepassingen en de technische en financiële vereisten die bepaald werden in een workshop met steden en gemeenten (**Error! Reference source not found.**). In onze MCA werd ervoor gekozen om de afzonderlijke criteria niet te sommeren tot 1 waarde maar de verschillende criteria apart weer te geven. De keuze van sensor wordt verder bepaald door de toepassing, hier gedefinieerd vanuit de geaffecteerde zone. Parameters die daarbij vastgelegd worden zijn:

- Tijdsperiode beschikbaarheid resultaten
- Visualisatie resultaten
- Tijdsresolutie
- Toegelaten afwijking op de metingen
- Types gemeten stoffen
- Aantal meetpunten per gemeente

Op basis van deze multicriteria analyse en de specificatielijst van beschikbare sensorboxen werd vervolgens een online sensor selectietool (§4.4) ontwikkeld die door lokale besturen kan gebruikt worden om een geschikte sensorbox te vinden.

4.4. SELECTIETOOL

De selectietool stelt een gebruiker in staat om uitgaande van een specifieke case een overzicht te bekomen van bruikbare systemen en informatie te verstrekken die de gebruiker in staat stelt om de beste keuze te maken. De selectietool kent een stapsgewijze opbouw.

In eerste instantie worden de minimale vereisten bepaald. De **minimale vereisten** (polluenten en stroomvoorziening) geven aanleiding tot exclusie van een aantal sensorboxen, die niet weerhouden worden in de verdere selectie. In tweede instantie worden enkele belangrijke **kwalitatieve en kwantitatieve criteria** ingevuld om tot de verdere selectie te komen. Die selectie wordt in tabelvorm weergegeven, en stelt de gebruiker in staat om een vergelijking te maken en tot een finale selectie te komen.

- ▶ Kostprijs, leverancier
- ▶ Afmetingen
- ▶ Meetprincipe sensor (optische deeltjester, elektrochemisch)
- ▶ Extra parameters
 - Temperatuur, Relatieve vochtigheid, luchtdruk
- ▶ Plug and play
- ▶ Weersbestendige behuizing
- ▶ Gekalibreerd
- ▶ Connectiviteit
 - WiFi, LORA, GSM,...
- ▶ Energievoorziening
 - Netstroom/autonoom (batterij, zonnepaneel)
- ▶ Data logging
 - Lokaal/cloud
- ▶ Kostprijs (sensorbox)
 - Max. ingeven

De ontwikkelde [sensor selectietool](#) is nu ter beschikking gesteld op de EMIS website (Figuur 12).

Deze tool werd ontwikkeld op basis van de verzamelde data in de literatuurstudie.

AFBEELDING	SENSORBOX	SENSOREN	STROOMVOORZIENING	KOSTPRIJS	TESTRESULTATEN BESCHIKBAAR
	Air Quality Egg 2018 Model	PM, NO2, O3	Netstroom	2000 EUR	Ja
	Airbeam	PM	Netstroom	205 EUR	Ja
	Airbeam 2	PM	Netstroom	205 EUR	Ja
	Airbox	PM, NO2, O3	Netstroom	275 EUR	Ja
	Airly PM	PM	Netstroom, Optie zonnepaneel	300 EUR	Ja
	Airly PM+GAS type 1	PM, NO2, O3	Netstroom, Optie zonnepaneel	300 EUR	Ja
	Airly PM+GAS type 2	PM	Netstroom, Optie zonnepaneel	300 EUR	Ja

Sensorbox: Airly PM+GAS type 1	
Afbeelding	
Kostprijs	300 EUR
Leverancier	Airly
Website leverancier	https://airly.org/en
Beschikbaar	ja
Sensoren	PM NO2 O3
PM-sensor type	lazer particle counter
PM-sensor eenheid	µg/m³
PM-sensor PM-fractie	PM2.5, PM10
PM-sensor geeft NPC weer	nee
NO2-sensor type	electrochemisch
NO2-sensor eenheid	µg/m³

Figuur 12 Screenshots van de ontwikkelde [sensor selectietool](#) beschikbaar via de EMIS website

4.5. CONCLUSIES

Er is een verschil tussen sensor, sensorsysteem en sensor solution. **Sensoren** zijn de detectoren die de concentratie van een luchtpolluent(en) meten. Een **sensorsysteem** is een operationele box bestaande uit een of meerdere sensor(en), een beschermende en/of weersbestendige box, eventuele luchttoevoer, stroomvoorziening, elektronica, software voor data collectie, data behandeling en data transfer protocol. Verder zijn er **sensor solutions** die bovenop de operationele sensorsystemen een platform/service aanbieden voor kalibratie, data-visualisatie, alarms, data-analyse,... etc.

Uit overleg kwam naar voor dat voor steden en gemeenten de geïntegreerde sensorsystemen/solutions het meest interessant zijn om een netwerk uit te bouwen omdat de benodigde functionaliteiten voor stroomvoorziening, data behandeling en transmissie aanwezig zijn.

Wanneer we kijken naar de brede range aan beschikbare sensor(box)en voor het opmeten van luchtkwaliteit, is het belangrijk om een relevante selectie te kunnen maken voor de beoogde use case. Hierbij is volgende denkoefening van belang:

- **Meetopzet:** selecteer vooreerst het type meetopzet dat van belang is voor uw use case/onderzoeksvraag. Is een **vaste en/of mobiele** meting vereist in **binnen en/of buitenlucht**?
- **Relevante pollutent:** selecteer de juiste pollutent(en) die van belang zijn voor de beoogde use case. Afhankelijk van de beoogde omgeving (binnen (CO₂, VOC, PM₁₀, PM_{2.5}, CO, ...) vs buiten (NO₂, NO, PM₁, PM_{2.5},...)) en beoogde bron(nen); vb. verkeer (NO, NO₂, BC, UFP, PM₁), houtverbranding (BC, PM₁₀, PM_{2.5}) en scheepvaart (SO₂, NO₂).
- **Relevante sensor:** Na selectie van de meest relevante pollutent(en) kan overgegaan worden tot de selectie van relevante sensoren of sensorboxen op basis van minimale vereisten (exclusie-criteria) en kwalitatieve/kwantitatieve (differentiërende) evaluatiecriteria. Hiervoor kan de ontwikkelde EMIS selectietool een belangrijk hulpmiddel zijn.

HOOFDSTUK 5. NETWERKVEREISTEN

5.1. OPZET

Recente ontwikkelingen op sensor en Internet-of-Things (IoT) gebied, maken het vandaag mogelijk om luchtkwaliteitssensoren continu en draadloos in te zetten in je stad/gemeente. Afhankelijk van de specifieke vereisten in functie van databeschikbaarheid en hoeveelheid gegevens (~meetfrequentie) kunnen sensorsystemen (functionele sensorbox met power/transmissie/behuizing) worden geoptimaliseerd qua netwerktechnologie. Een overzicht van de meest courante datacommunicatie technologieën werd opgemaakt door Imec⁴. Het document geeft een overzicht van de bedekkingsgraad, business model en technische informatie van WIFI en Low-Power Wide Area Network technologieën LoRaWAN, Sigfox en NB-IoT.

Wanneer lokale besturen gebruik maken van commercieel beschikbare sensorsystemen of solutions zijn deze netwerktechnologieën vaak al geoptimaliseerd (of wordt een relevant selectie aangeboden) door de sensorfabrikant/leverancier.

5.2. NETWERKTECHNOLOGIEËN

WiFi wordt beschouwd als lokale technologie voor binnenshuis/smart home toepassingen met een typische transmissierange van maximaal ~150m en wordt sterk beïnvloed door obstakels zoals bomen, muren, gebouwen,... . Bovendien is de snelheid van het netwerk variabel afhankelijk van de versie en gebruikte frequentie, belasting van het netwerk en afstand tot de gateway/hotspot. Voor binnentoepassingen is WiFi ideaal aangezien het netwerk kan geoptimaliseerd worden met behulp van access points.

Het grote verschil tussen WiFi en de andere Low-Power, Wide Area Networks (LPWAN) technologieën is dat LPWAN is geoptimaliseerd voor datatransmissie over grote afstanden (tot meer dan 10 km). Sigfox en LoRaWAN zijn niet gelicensieerd (je kan private netwerken uitrollen), terwijl NB-IoT via een operator wordt aangeboden (zoals LTE/4G). Sigfox wordt in België via Engie m2m uitgebaat.

Voor wat betreft toepassing van deze netwerktechnologieën voor luchtkwaliteitssensoren moeten volgende aspecten worden afgewogen: binnen/buitentoepassingen, frequentie/hoeveelheid datatransmissie, stroomverbruik (Tabel 3).

Tabel 3 Eigenschappen van IoT netwerktechnologieën WiFi, SigFox, LoRaWAN en NB-IoT

Technologie	Licensed spectrum	Dekking België	Operator	Prijs	Berichten/dag	Low-power
Wifi	No	variabel	Orange, Telenet, Proximus	variabel	"ongelimiteerd (MB/month)"	*
SigFox	No	99% (indoor!)	Engie m2m	€ 3-7 /device /year	140 uplink (12 bytes)	***

LoRaWAN	No	99% (Proximus)	The Things Network ¹ , Wireless Things ² , and Proximus ³ 500+ bedrijven en privaat		288 messages	****
NB-IoT	Yes	Similar to 4G: 99% (indoor!)	Orange, Telenet/Proximus onder ontwikkeling	€ 11-18 /device /year	“ongelimiteerd (MB/month)”	**

Aangezien de netwerktechnologieën een impact hebben op de hoeveelheid data die verstuurd kan worden en het energieverbruik, zal de keuze van finale sensortechnologie een combinatie zijn van sensoreigenschappen (mobiel/vast, low-power/energieintensief), energieverbruik (batterij, zonnepaneel, netstroom) en netwerktechnologie (Tabel 4). Dit is van belang wanneer je zelf een functionele sensorbox zou samenstellen, maar bij het gebruik van een commerciële sensorbox zijn al deze keuzes vaak al gemaakt.

Tabel 4 Hardwarevereisten voor verschillende sensortoepassingen (uit Hofman et al. ¹)

Hardwarevereisten	Buitenlucht			Binnenlucht	
	Draagbaar (persoonlijke sensor)	Mobiel continu (sensoren op carrier)	Vast continu (sensornetwerk)	Draagbaar (persoonlijke sensor)	Vast continu (sensornetwerk)
Low-power	X	X	-	X	-
Weersbestendige behuizing	-	X	X	-	-
Meetresolutie	~1-10 sec	~1-10 sec	~5-15 min	~1-10 sec	~5-15 min
Stroomvoorziening	batterij	Batterij/5V connector auto	Netstroom, batterij, zonnepaneel	batterij	netstroom
Netwerk	Bluetooth, GPRS, NB-IoT	Bluetooth, GPRS, NB-IoT	LoRaWAN, SigFox, WiFi, NB-IoT, GPRS	WiFi, GPRS, NB- IoT	WiFi, SigFox, GPRS, NB-IoT
...					

5.3. CONCLUSIES

De keuze van netwerktechnologie zal voornamelijk een impact hebben op de hoeveelheid data die (real-time) verstuurd kan worden (~meetresolutie), het energieverbruik en de finale kost van je totaaloplossing. Als geen lokale internetverbinding (WiFi, ethernet) voorhanden is, zijn LoRa en SigFox vrij goedkope en robuuste technologieën voor het versturen van data over grote afstanden zolang geen hoge meetresolutie benodigd is. NB-IoT kan gebruikt worden om meer berichten te versturen tegen een hogere frequentie. In de praktijk voorzien huidige sensorfabrikanten al een of meerdere geoptimaliseerde netwerkopties voor de klant.

¹ <https://www.thethingsnetwork.org>

² <http://wirelessthings.be>

³ https://www.proximus.be/en/id_cl_10t/companies-and-public-sector/solutions/connected-business/internet-of-things.html

HOOFDSTUK 6. VISUALISATIE EN COMMUNICATIE

6.1. OPZET

Aangezien sensornetwerken de mogelijkheid bieden om luchtkwaliteitsdata op een verhoogde ruimtelijke en temporele meetresolutie te verzamelen, door verschillende partijen/gebruikers kunnen worden uitgerold (lokale overheden, burgers, kennisinstituten, industrie, ...) en moeten gekaderd worden qua datakwaliteit en interpretatie, is visualisatie en communicatie van meetresultaten naar de beoogde doelgroep (vb burgers) erg belangrijk.

Qua visualisatie zijn verschillende opties mogelijk:

- Kaart met locaties meetpunten (en referentiestationen)
- Kleurcodes op basis van Air Quality Index (vb BELAQI)
- Tijdreeks met uurgemiddelden van voorbij 24u
- Daggemiddelden van verschillende meetlocaties
- ...

Enkele voorbeelden van gangbare visualisaties:

- <https://www.vmm.be/lucht/actuele-luchtkwaliteit>
- <https://www.irceline.be/nl>
- <https://samenvoorzuiverelucht.eu/dataportaal/>
- <https://sensor.community/nl/>
- <https://airly.org/map/en/>

6.2. CO-DESIGN WORKSHOP

Om inzicht te krijgen over de vereisten voor visualisatie voor de burgers werd een co-design workshop georganiseerd door IMEC werd samen met 7 burgers uit de gemeente Schoten. In deze workshop werd onderzocht hoe burgers geïnformeerd willen worden over de meetresultaten van sensorboxen. Uit de resultaten kwam naar voren dat burgers huidige platformen die de luchtkwaliteit in kaart brengen (VMM, Irceline, BelAir, BrusselsAir, InfluencaAir, Community Sense,...) positief beoordelen qua functionaliteiten (laagdrempelig, diurnaal verloop, overzicht, visuele interpretatie, selectie parameters,...) maar dat het grote aanbod van deze platformen ook voor onduidelijkheid zorgt (nood aan 1 go-to website voor omgevingsmetingen).

De focus ging dan ook uit naar eventuele samenwerkingsmogelijkheden en aspecten waarop andere netwerken zich nog zouden kunnen differentiëren. Differentiërende aspecten omvatten:

- **Real-time metingen op lokaal niveau (hogere resolutiemetingen)**
- **Link tussen luchtkwaliteit en maatregelen/meldingen**

Gewenste functionaliteiten (user stories) van een nieuw visualisatieplatform vanuit het perspectief/persona "burger" werden besproken met betrekking tot het algemene platform, kaart, grafiek, informatie over de metingen, metingen algemeen, maatregelen, impact en oorzaken metingen, meldingen en alarmen en sensibilisering.

Het valt hierbij op dat burgers aangeven dat er gedifferentieerd kan worden in de aangeboden informatie over de meting (interpretatie/informatie/context) en de geïmplementeerde/geplande maatregelen en dus algemene **duiding met betrekking tot luchtkwaliteit** (Tabel 5).

Tabel 5 Gewenste functionaliteiten van een visualisatieplatform met betrekking tot informatie over de metingen en geïmplementeerde/geplande maatregelen

User story	Prioriteit
Als burger wil ik dat de waarden zowel op een wetenschappelijke en niet-wetenschappelijke manier worden voorgesteld (bv. aantal decibel + voorbeeld) zodat ik een duidelijker beeld krijg van die specifieke waarde (interpretatie)	Must have
Als burger wil ik per pollutant meer informatie over de impact van de pollutant op de gezondheid	Must have
Als burger wil ik inzicht krijgen op de juistheid van de metingen	Must have
Als burger wil ik info over de metingen - wikipedia van stoffen - zodat ik weet wat de verschillende stoffen zijn (bv. PM10, PM2,5, NO2, fijn stof, black carbon,...) die worden gemeten op elk meetpunt	Must have
Op de kaart of grafiek van de metingen wil ik kunnen doorklikken om meer wetenschappelijke uitleg te vinden over de metingen	Should have
Als burger wil ik een referentie of norm krijgen (bv. op kaart, grafiek, in extra uitleg) zodat ik weet in welke mate een bepaalde waarde alarmerend is en ik een interpretatie kan geven aan de waarde. Deze referentie kan bijvoorbeeld weergegeven worden met een kleur. (referentie/norm) Zo krijg ik inzicht in de wettelijke norm en deze van de wereldgezondheidsorganisatie	Not defined
Als burger wil ik links naar andere instanties zoals VMM of de wereldgezondheidsorganisatie zodat ik meer informatie kan krijgen	Not defined

User story	Prioriteit
Als burger wil ik geïnformeerd worden waarom bepaalde maatregelen genomen worden	Should have
Als burger wil ik inzicht krijgen in wanneer er resultaten gegeven kunnen worden van lopende projecten	Should have
Als burger wil ik inzicht in geplande maatregelen	Should have
Als burger wil ik geïnformeerd worden over de impact van de maatregelen die genomen worden door de overheid	Should have
Als burger wil ik geïnformeerd worden over de maatregelen die door de overheid genomen worden	Not defined
Als burger wil ik zowel voor overheden als voor particulieren suggesties doen rond maatregelen om luchtkwaliteit te verbeteren	Not defined
Als burger wil ik op een kaart drie lagen hebben (genomen maatregelen, huidige maatregelen en toekomstige maatregelen) zodat ik het effect van de maatregelen op een kaart kan zien	Not defined

6.3. WORKSHOP LOKALE OVERHEDEN

In de workshop lokale overheden werden voor elk van de gekozen onderzoeksvragen (geaffecteerde zones) communicatieconcepten uitgewerkt. Hiermee wordt aangegeven hoe de meetresultaten van het sensornetwerk naar de burger gecommuniceerd zullen worden. Dit met het achterliggende idee om te **sensibiliseren, begrip te creëren voor beleidsmaatregelen** en **gedragsverandering te faciliteren**. Burgers kunnen via verschillende communicatiekanalen en/of activiteiten worden betrokken:

- Workshop “bouw je eigen sensor”
- Visualisatie app
- Visualisatie bord
- Spel vervoerskeuze
- Knelpunt overzicht
- Route dashboard
- ...

In de workshop werden communicatieconcepten “Visualisatie bord” voor de zone “druk verkeer” bij het “milieuambtenaar” persona en “Route dashboard” voor de zone “onderweg” bij het “bewuste

school” persona. Hierbij is het van belang om bij de start de beoogde doelgroep te identificeren, de assumpties van de resultaten te bepalen en deze eventueel af te toetsen via kleine experimenten.

In de Board of Innovation workshop werden voor alle concepten assumpties gedefinieerd en voor deze assumpties experimenten opgesteld. Voor de opzet van elk experiment werd er getracht om de te testen assumptie met een zo klein mogelijk experiment te (in)valideren, om het opzetten van een dure pilot te vermijden.

Voor het concept visualisatiebord (zone “druk verkeer” bij persona “milieuambtenaar”) kwamen vb volgende 5 assumpties naar voren, in volgorde van belangrijkheid:

- Fietzers gaan de omleiding volgen (wanneer zij een route met gezondere luchtkwaliteit aangeboden krijgen en de huidige route ongezond is).
- Automobilisten zijn bereid om de omleiding te volgen.
- Na invoering maatregel is het resultaat op de luchtkwaliteit zichtbaar
- De milieuambtenaar is bereid een maatregel in te voeren met openbaar resultaat.
- De milieuambtenaar heeft budget om visualisatie borden te plaatsen (op hotspots én op greenspots)
- De gekozen maatregel heeft een door een sensor te meten effect

Er kan vervolgens een (klein) experiment worden opgezet om deze assumpties te testen:

Experiment Kaart

#1: FIETTERS VOLGEN OMLEIDING

1 Type experiment
A/B test, uitleg video, voorverkoop, ...

Simulatie

2 Beschrijving
Wat moet er getest worden en hoe gaat het in zijn werk?

Beïnvloeding verkeersstroom met informatie onder vorm van advies of maatregel. Plaatsing telraam en fake bord (op basis van data VMM).

3 Voor
Beschrijf het doelpubliek van dit experiment

Fietzers in projectgemeente

4 Succes
Beschrijf wanneer het resultaat van dit experiment een succes is

Minimaal 5% tot 10% van de fietsers kiest voor aangegeven alternatieve route.

5 To do
Wat moet er in welke volgorde gebeuren om dit experiment uit te voeren?

1 Geslakte gemeente zoeken

2 Bepaling gezondere route op basis van data VMM

3 Plaatsing fake bord en telraam

4 Uitvoering voormeting

5 Uitvoering experiment

6 Resultaat bespreken met projectpartners, VITO en VMM. Itereren.

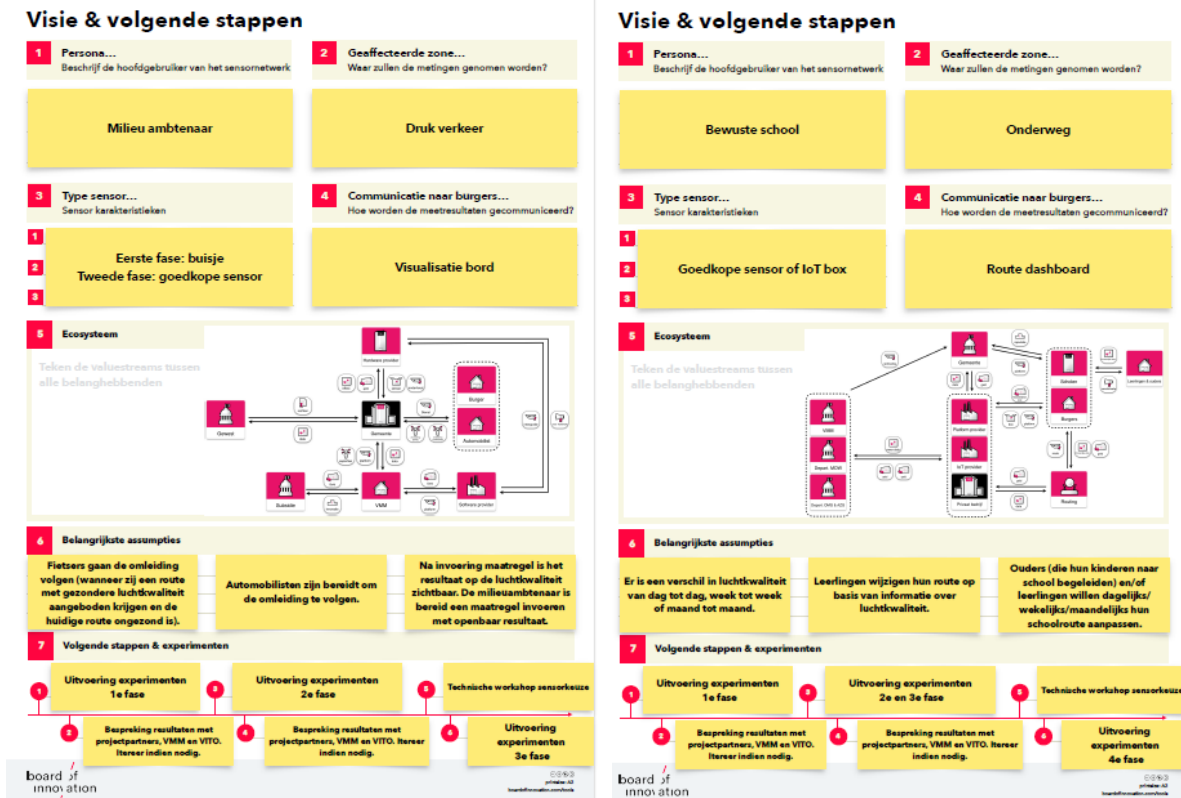
Teken het!

board of innovation

About this tool
De "Experiment Kaart" helpt om de opzet van een experiment te structureren. Het experiment dient er voor een eerder bepaalde assumptie te (in)valideren. In plaats van een uitgebreide pilot op te zetten, is het de bedoeling een zo klein mogelijk experiment op te zetten om datgene te (in)valideren waar men nog niet zeker van is.

© 2018 VITO
printsize: A4

Tot slot werden in de workshop 2 totaalconcepten (visualisatiebord- druk verkeer - milieuambtenaar en dashboard - schoolroute – bewuste school) uitgewerkt via de processtappen omschreven in *Figuur 4*. Het resultaat van deze totaalconcepten kan teruggevonden worden in *Figuur 13*.



Figuur 13 Totaalconcept visualisatiebord druk verkeer voor persona milieuambtenaar (links) en dashboard schoolroutes voor persona bewuste school (rechts).

HOOFDSTUK 7. USE CASES

7.1. OPZET

Op basis van de verworven kennis en ervaringen met betrekking tot het opzetten van sensornetwerken werden 2 pilotstudies uitgevoerd in Kampenhout en Sint-Niklaas om praktijkervaring op te doen en de bruikbaarheid van gemeentelijke sensornetwerken te evalueren. Hierbij worden volgende aspecten verder bestudeerd:

- het gebruiksgemak van het sensornetwerk;
- de betrouwbaarheid van het netwerk naar datacaptatie en datacommunicatie;
- de kwaliteit van de verzamelde gegevens;
- de informatie-extractie uit de meetgegevens ;
- de visualisatie van de data.

De beoordeling van de testopstellingen vanuit een gebruikersperspectief wordt in detail besproken in het globale analyserapport⁵.

7.2. PILOOTSTUDIES IN COT PROJECT

Het doel van beide pilotstudies was om de bruikbaarheid van een sensornetwerk te evalueren voor het opmeten van de impact van wegverkeer, zowel nabij een school (§7.3) als in een stadscentrum (§7.4). Het meetopzet moest dus worden geoptimaliseerd voor buitenmetingen van verkeersgerelateerde polluenten op vaste meetlocaties. We starten dan ook met het definiëren van de functionele vereisten:

➔ **Overzicht vereisten (exclusie vereisten in bold):**

Polluenten	NO₂, PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀
Duur	3 maanden/pilot
Bijkomende parameters	Temperatuur, luchtvochtigheid
Aantal sensoren/meetlocaties	Minimaal 3, bij voorkeur 5
Locatie	Outdoor, weersbestendig
Elektriciteit	Nee, via zonnepaneel
Communicatie	Geen WiFi beschikbaar, via GSM
Kwaliteit metingen	Hoog kwalitatief Goede vergelijkbaarheid tussen sensorboxen Vergelijking scenario's met veranderde mobiliteit

Op basis van het beoogde doel en de functionele vereisten (en voorgaande literatuurstudie) werd een olijsting gemaakt van commercieel beschikbare sensorboxen (Tabel 6).

Tabel 6: Olijsting selectie criteria voor de case in Kampenhout en prestaties van sensorboxen.

Naam	Polluent		Weerbestendig	Meetfrequentie	Stroom			Datacommunicatie		Kwaliteit (R ²)		Visualisatie	Kostprijs Indicatief (5 SB)
	NO ₂	PM _{2.5}			net	batt	zon	WIFI	GSM	NO ₂	PM _{2.5}		
AQMesh	+	+	+	+	+	+	+	-	+	0,04 tot 0,45	0,26	+	30 kEUR

Kunak	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0,25 tot 0,33	0,55 tot 0,72	+	30 KEUR
AQT	+	+	+	+	+	+	-	+	-	0,43 tot 0,61	n/a	+	30 KEUR
AQY	+	+	+	+	+	-	-	+	(+)	0,41 tot 0,56	0,78 tot 0,87	+	18 KEUR (?)
Praxis	+	+	+	+	+	+	-	-	+	n/a	n/a	+	25 KEUR
Cairpol/cairsens	+	?	+							n/a	n/a		
AirVeraCity	+	+	+	+	+	+	-			n/a	n/a	+	45 KEUR
SCI - 608	+	+	+	n/a	+	-	+	-	+	n/a	n/a	+	25 KEUR
Airly	+	+	+	n/a	+	-	+	+	+	n/a	n/a	+	2 KEUR
Plug 'n sense	+	+	+	+	+	-(?)	+	+	+	n/a	n/a	-	?
AirSensEUR	+	+	+	+	+	+(1d)	-	+	+	0,89	n/a	-	12,5 KEUR

Op basis van de oplistijng in Tabel 6 en de specifieke vereisten met betrekking tot pollutanten, stroom, communicatie en kwaliteit van de meting werden 2 meetsystemen (Airly en Kunak) met sterk uiteenlopende prijs (Tabel 6) geselecteerd, en 3 sensoren per meetstelsysteem aangekocht. De beslissing voor keuze gebeurde door de deelnemende gemeenten op basis van een shortlist van de eerder verrichtte literatuurstudie en marktanalyse (2020/HEALTH/R/2098).

7.2.1. DATAKWALITEIT

Om de datakwaliteit van deze systemen na te gaan werden ze voor minstens 2 weken op een VMM meetstation (R802; stedelijk achtergrondstation) **gecoloceerd voor en na elke pilootstudie** om ook de datakwaliteit doorheen de tijd te kunnen evalueren. Op basis van de co-locatiecampagnes werd duidelijk dat de onderlinge vergelijkbaarheid van de sensoren over het algemeen goed was, maar de vergelijkbaarheid met de referentiemetingen (ondanks hun bedrijfskalibratie) niet altijd goed is. Door middel van een herschaling/correctie werd de onderlinge vergelijkbaarheid en vergelijkbaarheid met de referentie verbeterd. Dit proces werd herhaald voor elke pilootstudie omdat we ondervonden dat de herschalingsmodellen verlopen doorheen de tijd (veranderende impact van omgevingscondities, vb temperatuur en relatieve vochtigheid, op de sensoren).

7.3. PILOOTSTUDIE KAMPENHOUT

7.3.1. OPZET

Het doel van de pilot in Kampenhout was om de luchtkwaliteit rond de Parkschool (Relst) te verbeteren met behulp van verkeersmaatregelen. Concreet werden twee verkeersmaatregelen geëvalueerd;

- **een knip** waarbij het verkeer in 1 rijrichting werd afgesloten tijdens de openings- (8-8:30u) en sluitingsuren (15-15:30) van de school met als doel om het doorgaand (sluip) wegverkeer te weren.
- **een schoolstraat** waarbij het verkeer volledig werd afgesloten tijdens de openings- (8-8:30u) en sluitingsuren (15-15:30) van de school met als doel om al het wegverkeer te weren.

7.3.2. SENSORNETWERK

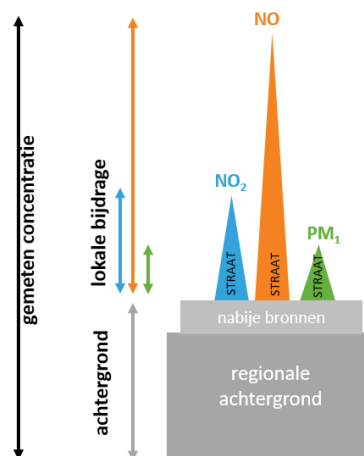
Er werden 3 meetlocaties geselecteerd; 1 achtergrondlocatie, 1 schoollocatie aan de straatkant voor de school (hier werd de impact van de maatregel gemeten) en 1 omgevingslocatie aan de straatkant

buiten het afgesloten gebied. Aan de schoollocatie werd stroom voorzien, terwijl op de 2 andere locaties de sensoren werden uitgerust met een zonnepaneel. Op elke meetlocatie werd zowel een Airly als een Kunak sensor bevestigd.

Gedurende 3 maanden werden verschillende scenario's (baseline, knip, schoolstraat) doorlopen met ook de invloed van een schoolvakantie (verlof). Op basis van de voorgaande co-locatiemetingen naast een referentiestation werden goed presterende en verkeersrelevante polluenten geselecteerd (NO_2 , NO en PM_{10}) voor de evaluatie van een potentiële impact van de verkeersmaatregelen (knip, schoolstraat).

7.3.3. RESULTATEN

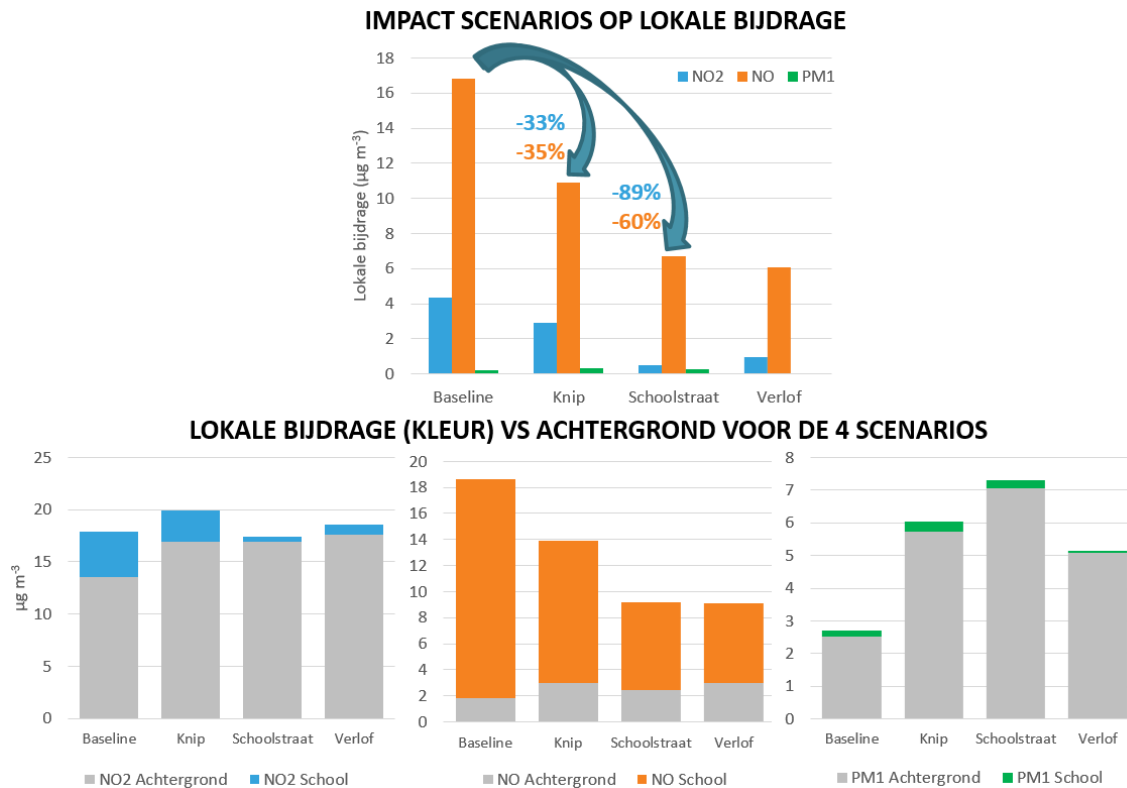
Het doel van deze use case was om de impact van verkeersmaatregelen op de lokale luchtkwaliteit nabij een school te evalueren. Hierbij is het van belang om te beseffen dat een gemeten concentratie steeds bestaat uit zowel een achtergrondbijdrage (regionale, stedelijke en nabije bronnen (N21, N26 in dit geval)) en lokale bijdrage (lokale bronnen: schoolverkeer). De geïmplementeerde verkeersmaatregelen (knip en schoolstraat) hebben enkel impact op de lokale bijdrage en hebben geen impact hebben op de achtergrondconcentraties. Verschillen die te wijten zijn aan veranderingen in achtergrondconcentraties, zijn identiek op achtergrond locatie als op de schoollocatie. De verhouding achtergrond/lokale bijdrage verschillen van pollutant tot pollutant (grootte lokale piek NO_2 , NO, PM_{10} op Figuur 14).



Figuur 14 Schematische voorstelling bronbijdrage van de straat in de totale concentratie

Na correctie voor de achtergrondconcentraties zien we **gedurende de scenario's** (8-9u/11-12u (woensdag)/15-16u) duidelijke **concentratieafnames in de lokale bijdrage** voor NO (tot 60%) en NO_2 (tot 89%) ten gevolge van de knip en schoolstraat. De schoolstraat lijkt hierbij de meest efficiënte verkeersmaatregel met resulterende lokale pollutantbijdragen vergelijkbaar met verlofdagen. Voor PM_{10} zien we geen extra bijdrage op de schoollocatie ($\sim 0.2 \mu\text{g m}^{-3}$) waardoor ook geen effecten van de verkeersscenario's kunnen worden waargenomen. Rekening houdend met het landelijk karakter (\sim verkeersdrukke, \sim gemeten concentraties) van de beschouwde monitoringlocaties en de beperkte implementatietijd van de scenario's (30min tijdens ochtend, 45min tijdens namiddag) kunnen we stellen dat de verkeersmaatregelen een duidelijke impact lijken te hebben op de lokale luchtkwaliteit.

In dit geval is het duidelijk dat de lokale verkeersbijdrage (schoollocatie vs achtergrond) het grootst is voor NO, gevolgd door NO₂ en PM₁ (verwaarloosbaar; Figuur 15). De lokale bijdrage is dan ook de maximale impact die lokale verkeersmaatregelen (in dit geval knip en schoolstraat) kunnen hebben. In Figuur 15 wordt deze impact procentueel weergegeven als waargenomen concentratiereductie van de lokale bijdrage (zonder achtergrondconcentratie). **Om toekomstige lokale verkeersmaatregelen te evalueren lijkt het dan ook belangrijk om zeker NO en NO₂ in het meetopzet mee te nemen.**



Figuur 15 Samenvatting van NO₂, NO en PM₁ meetresultaten: bijdrage van lokaal verkeer vs achtergrondconcentratie gedurende de scenarios (onder) en impact van de geïmplementeerde scenario's op de lokale NO₂, NO en PM₁ bijdrage tijdens de geïmplementeerde scenario's (boven)



City Of Things

Kamperhout use-case



Metingen

Bijdrage van verkeer (NO, NO₂ & PM₁) wordt gemeten aan de school en op een achtergrondlocatie (zonder verkeer). Door de achtergrondconcentratie af te trekken van de schoolconcentratie verkrijgen we de lokale verkeersbijdrage ter hoogte van de school.



Verkeersscenario's

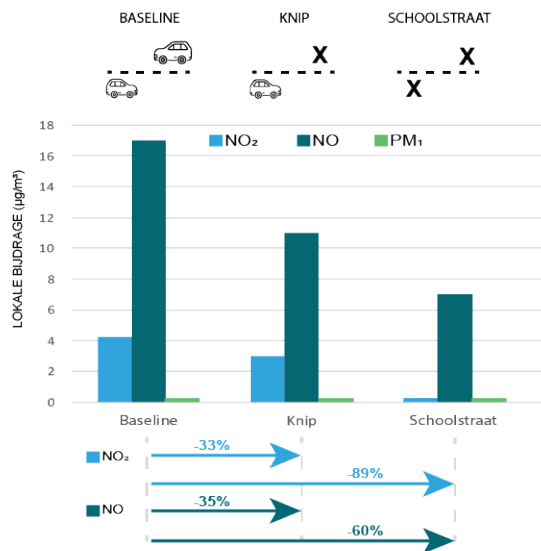
Om de effecten van verkeersmaatregelen op lokale bijdragen aan te tonen werden verschillende verkeersscenario's geïmplementeerd:

- Baseline = huidige situatie
- Knip = schoolstraat afgesloten in 1 rijrichting
- Schoolstraat = schoolstraat volledig afgesloten voor verkeer

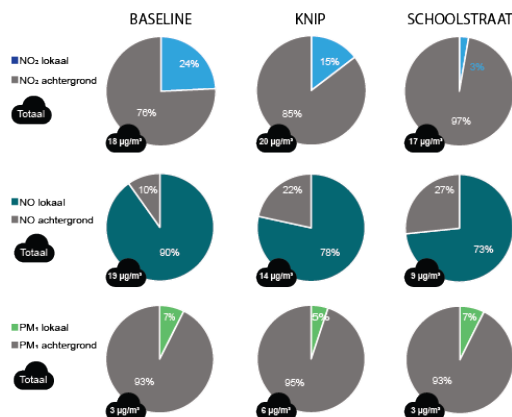


Resultaten

IMPACT MAATREGELEN OP LOKALE BIJDRADE



LOKALE BIJDRADE VS ACHTERGROND



7.4. PILOOTSTUDIE SINT-NIKLAAS

7.4.1. OPZET

In uitvoering van een nieuw mobiliteitsplan in Sint-Niklaas zal op termijn een 'knip' voor doorgaand verkeer dienen te worden gerealiseerd ter hoogte van de Grote Markt (stadscentrum). Als bijkomende trigger voor het beleid om versneld over te gaan tot de invoering van de 'knip' is het wenselijk de impact van de verkeerssituatie op de luchtkwaliteit te kennen voor en na de invoering ervan, waarbij kan verwacht worden dat de invoering (en de daarmee gepaard gaande sterke vermindering van de verkeersstroom) een positief effect zal hebben op de luchtkwaliteit. Het proefproject zou dienen als **'nulmeting' voor de eigenlijke invoering van de 'knip'**. Het is de bedoeling dat de metingen (op een liefst identieke manier) zouden herhaald worden na de invoering.

Hypothese: een slechte luchtkwaliteit ten gevolge van de dagelijkse, drukke verkeersdoorstroming ter hoogte van de Grote Markt en de aansluiting met de voornaamste toeleidingswegen (Parklaan & Plezantstraat). Verkeerscijfers nodig?

Betrokkenheid van de burger:

Bij het ontwerpproces voor de invoering van de 'knip' zal een grootschalig participatietraject met de burger worden opgezet. De verwerkte resultaten van de luchtkwaliteitsmetingen (nulmeting) zullen worden meegenomen in het luik 'probleemstelling' van het participatie traject. Het is niet de bedoeling een real time visualisatie voor de burger te voorzien bij de nulmeting.

7.4.2. SENSORNETWERK

Er werd gemeten op drie locaties:

- Locatie 1: Grote Markt 45-46; Apostelstraat; tussen busstrook en rijbaan.
- Locatie 2: Paul Snoekstraat, nabij Stadsschouwburg.
- Locatie 3: Grote Markt 15; Paul Snoekstraat; tussen busstrook en rijbaan.

Continue sensormetingen van in de periode 12/06/2021 t/m 15/08/2021 werden geanalyseerd.

7.4.3. RESULTATEN

De gemiddelde NO en NO₂-concentraties gedurende de hele meetcampagne liggen duidelijk hoger op meetlocaties 1 en 3 op de Grote Markt in vergelijking met meetlocatie 2 aan de stadsschouwburg (NO₂ tot 6 µg/m³ hoger op de Grote Markt en NO tot 8 µg/m³ hoger op de Grote Markt). Voor PM_x liggen de concentraties op de drie meetlocaties in Sint-Niklaas in dezelfde grootte-orde. De gemiddelde verschillen voor NO en NO₂ zijn groter dan de waargenomen onzekerheid tussen de sensoren en dus grotendeels toe te schrijven aan effectieve verschillen tussen de meetlocaties. Tijdens de ochtendspits worden dezelfde trends waargenomen, met een verhoogde NO en NO₂ concentratie op de Grote Markt in vergelijking met de achtergrondlocatie.

De NO₂ en NO-concentraties zijn veel lager op zondag (minder verkeer). Het is opvallend dat de concentraties op zondagochtend op de Grote Markt niet verhoogd zijn t.o.v. de achtergrondlocaties (integendeel, concentraties zijn dan iets hoger op de achtergrondlocatie). Dit is een duidelijke

indicatie dat het verkeer op de Grote Markt verantwoordelijk is voor de verhoogde NO₂ en NO-concentraties.



City Of Things

Sint-Niklaas use-case



Metingen

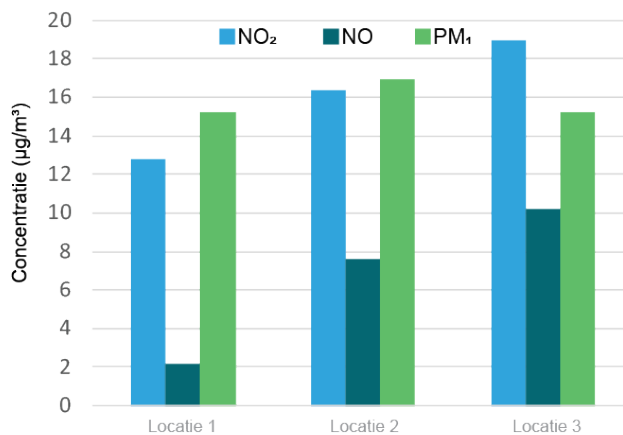
De luchtkwaliteit (NO, NO₂, PM₁) werd gemeten op een achtergrondlocatie en 2 meetlocaties op de Grote Markt. Door de achtergrondconcentratie af te trekken van de concentraties op de Grote Markt verkrijgen we de lokale verkeersbijdrage ter hoogte van de grote markt.

- Locatie 1: Paul Snoekstraat (achtergrond)
- Locatie 2: Grote Markt 45
- Locatie 3: Grote Markt 15

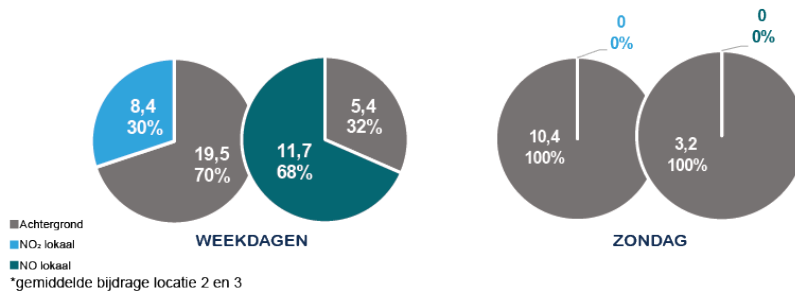


Resultaten

GEMIDDELDE CONCENTRATIE



LOKALE BIJDRAGE GROTE MARKT* vs ACHTERGROND



Belangrijke bijdrage van lokaal verkeer aan NO₂ en NO concentraties (PM₁ verwaarloosbaar) ter hoogte van de Grote Markt. Op zondag zien we geen (of zelfs negatieve) lokale bijdrage.

7.5. INZICHTEN UIT DE PILOOTSTUDIES

Er werd een globale oplijsting gemaakt van de bruikbaarheid en haalbaarheid van een gemeentelijk sensornetwerk vanuit een gebruikersperspectief in het globale analyserapport ⁵. De belangrijkste inzichten zetten we hier nog eens op een rij:

- **Aankoop en contact** met leverancier ging in ons geval vlot en snel
- Het **prijsverschil van de sensoren** is niet gerelateerd met de datakwaliteit, maar in ons geval wel met de maturiteit van het meetsysteem: configuratiemogelijkheden, dataanalyse, kwaliteitscontrole, operationele opvolging (warnings/alerts), ..
- **Operationele opvolging** van de sensorsystemen via de online dashboards werd als meerwaarde beoordeeld
- De **beschikbaarheid van de data** was erg goed. Er was dus weinig onderhoud/pechverhelping nodig
- Co-locatiecampagnes zijn van belang om de **datakwaliteit** te evalueren en de verkregen sensordata te evalueren in functie van onzekerheid (waargenomen concentratieverschillen vs onzekerheid sensoren)
- **Kalibratie/herschaling** kan de datakwaliteit sterk verbeteren, maar verloopt doorheen de tijd. Daarom is het wenselijk om gebruik te maken van herhaaldelijke kalibraties/herschalingen (zoals uitgevoerd tijdens de pilootstudies) of continue netwerkkalibraties¹³⁻¹⁷
- Om lokale **verkeersmaatregelen** op te meten geven **NO en NO₂** goede indicaties
- Gebruik een **achtergrondmeetlocatie** om te kunnen normaliseren voor achtergronddynamiek.

7.6. ERVARING BETROKKEN GEMEENTEN

Via een online bevraging werd na het lezen van het globale analyserapport (§7.5) feedback verzameld van de betrokken gemeenten (Oudenaarde, Dilbeek, Kampenhout en Sint-Niklaas) over de uitgevoerde pilootstudies. Op basis van 4 respondenten van 3 verschillende gemeenten (Oudenaarde, Kampenhout en Sint-Niklaas) kregen we inzicht in:

- Evaluatie van de pilootstudies
- Mogelijke knelpunten mbt gemeentelijke sensornetwerken
- Toekomstperspectief mbt gemeentelijke sensornetwerken

7.6.1. Evaluatie pilootstudie

De betrokken gemeenten gaven aan tevreden te zijn over de gebruiksvriendelijkheid en datadekking van de uitgerolde sensornetwerken en de bruikbaarheid van de resultaten voor de vooropgestelde onderzoeksvraag. Daarentegen gaven 2 respondenten aan minder tevreden te zijn over de vormfactor van de sensoren (groot zonnepaneel Airly, design). De helft geeft ook aan dat een gedegen achtergrondkennis benodigd is voor de analyse en interpretatie van de data, waardoor een gemeente dus steeds beroep zal moeten doen op een expert/derde partij (overheidsopdracht).

De gemeenten geven aan dat de resultaten van de sensornetwerken voldoende antwoord gaven op de vooropgestelde onderzoeksvragen in Kampenhout (100%) en Sint-Niklaas (75%), de beoogde verkeersmaatregelen voldoende verantwoord (100%) en met deze resultaten aan de slag kan in haar communicatie naar de burger/doelgroep (100%).

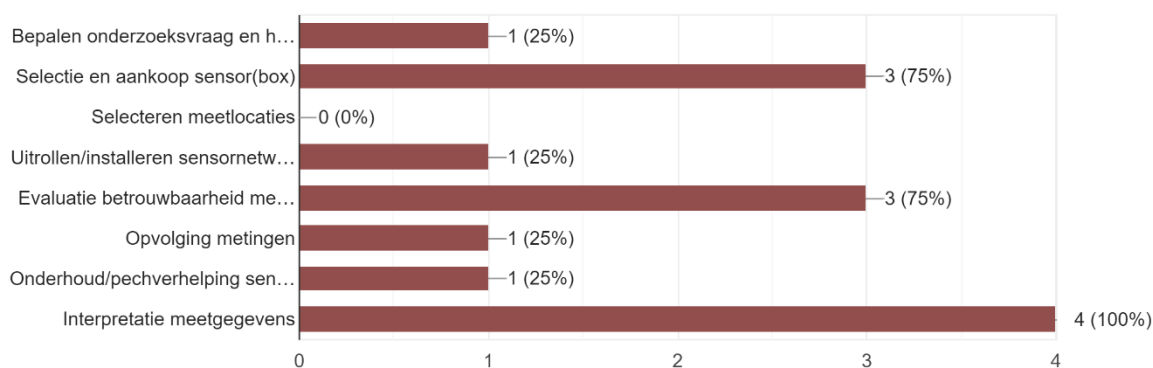
7.6.2. Knelpunten sensornetwerken

De respondenten geven aan dat tegemoet werd gekomen aan de vooraf geïdentificeerde knelpunten met betrekking sensornetwerken, namelijk interpretatie en betrouwbaarheid van de meetgegevens.

Het is duidelijk dat de betrokken gemeenten de selectie van de sensoren (75%), kalibratie (75%) en interpretatie van de sensormetingen (100%) als grootste uitdaging beschouwen voor gemeentelijke sensornetwerken, terwijl het bepalen van de onderzoeksvraag en hypothesen (100%) en selecteren van de meetlocaties (100%) voor gemeenten wel realistisch wordt ingeschat.

Op basis van de pilotstudies lijkt de grootste uitdaging voor een gemeentelijk sensornetwerk (meerdere keuzes mogelijk):

4 antwoorden



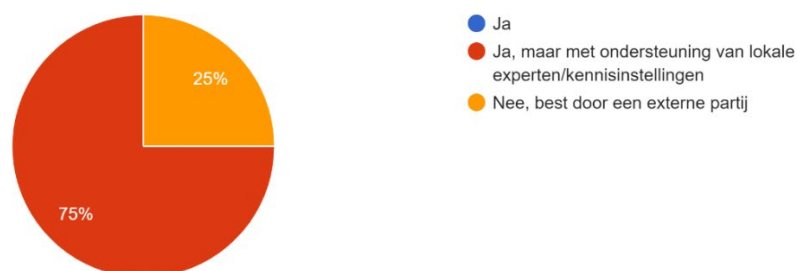
7.6.3. Toekomstperspectief

De betrokken gemeenten geven aan de verkregen resultaten te zullen communiceren naar de burger via visualisatiebord, website en infoavond. Daarnaast geeft ook 1 respondent aan dat communicatie via een expert moet gebeuren die de resultaten bijkomend kan duiden en vragen van burgers kan beoordelen.

Geen enkele gemeente geeft aan dat de uitgerolde pilots volledig op het niveau van de gemeente kunnen georganiseerd worden. 75% geeft aan ondersteuning nodig te hebben voor bepaalde taken terwijl 25% aangeeft de volledige pilot uit te besteden aan een externe partij. Qua externe partijen worden provincie, overheidsdiensten (VMM), studiebureaus, kennisinstellingen en LOGO experts (<https://vlaamse-logos.be/>) aangehaald, voornamelijk voor taken met betrekking tot kalibratie, interpretatie en visualisatie van de sensormetingen.

Zou een dergelijke use case op het niveau van gemeente kunnen georganiseerd worden?

4 antwoorden



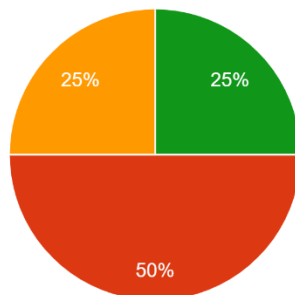
Op basis van de ervaringen uit de pilootstudies zien gemeenten nog bijkomende toepassingen voor sensornetwerken:

- Rol van stedelijk groen (“groene longen”) voor luchtkwaliteit
- Fijn stof in havengebied
- Lange termijn evaluatie van beleidsmaatregelen

Voor toekomstige sensornetwerken zou 50% van de gemeenten het project als overheidsopdracht laten uitvoeren (volledige uitbesteding) met een rapport als resultaat en 50% in overleg/samenwerking met externe partner/experts.

Stel dat je gemeente/stad nu kiest voor een sensornetwerk, welk scenario geniet dan je voorkeur:

4 antwoorden



- De gemeente/stad koopt de sensoren zelf aan en doet installatie zelf en ook communicatie met de leverancier:
- De gemeente/stad laat een project uitvoeren waarbij ze zelf geen praktische installatie enz moeten doen en het res...
- Uiteraard in nauw overleg met milieudienst (huidige samenwerking lij...
- toch zeker een partner nodig die bijdrage levert voor calibratie e.d. + oo...

7.6.4. Conclusie

De gemeenten die betrokken waren in de pilootstudies geven aan dat de resultaten uit de pilootstudies een antwoord bieden op de vooropgestelde onderzoeksvraag, geplande verkeersmaatregelen voldoende verantwoord en bruikbaar zijn in hun communicatie naar de burger. Ook vanuit een operationeel standpunt lijken de gemeenten tevreden met de data, beschikbaarheid en opvolging/visualisatie.

Daarentegen kunnen we ook concluderen dat het zelfstandig opzetten van een sensornetwerk op gemeentelijk/stedelijk niveau (nog) niet als haalbaar wordt beschouwd. Vooral voor wat betreft kalibratie, betrouwbaarheid en interpretatie van de meetgegevens geven de gemeenten aan ondersteuning nodig te hebben van experts en/of externe partijen. Toekomstige sensorprojecten zien de gemeenten dan ook enkel zinvol via een gedeeltelijke of volledige uitbesteding naar experts, overheidsdiensten, studie bureaus of kennisinstellingen.

“Zonder medewerking van VMM of/een gespecialiseerde kennisinstelling is het onmogelijk voor gemeenten om een gelijkaardig traject te lopen. Het is heel moeilijk op voorhand in te schatten of de onderzoeksvraag consistent is door gebrek aan kennis. Interpretatie van luchtkwaliteitsmetingen is hoofdzakelijk een technische aangelegenheid, en gemeenten/steden hebben onvoldoende know-how om dit op eigen houtje te doen.”

(citaat uit feedback van online bevraging)

HOOFDSTUK 8. BUSINESS CASE

8.1. OPZET

Op basis van de literatuurstudie, oplistijng van de sensoren en de praktijkervaringen uit de pilootstudies wordt een business case uitgewerkt. De focus van deze oefening ligt vooral op het in kaart brengen van de investeringskosten (rekening houdend met de verschillende toepassingen) en het bepalen van de operationele kost (onderhoud netwerk, kalibratie, vervanging sensoren, ...) na uitrol van het sensornetwerk. Het is namelijk belangrijk om te beseffen dat de kosten van een sensornetwerk **niet beperkt zijn tot de aankoop van de sensoren**, maar ook tijd en investeringskosten vergen voor het **voortraject, uitrol en operationeel houden van het sensornetwerk, data-analyse en interpretatie** en eventuele **communicatiecampagne**.

8.2. VOORTRAJECT

Vooraleer sensoren kunnen worden geselecteerd en uitgerold is een voortraject onmisbaar voor het definiëren van de onderzoeksvraag, het ecosysteem (gebruiker, doelgroep en begunstigden), meetopzet en bijhorende hypothesen. Inspiratie voor een dergelijk voortraject kan gehaald worden uit HOOFDSTUK 3 of de [VAQUUMS roadmap](#) met [brainstorm templates](#) ².

Dit voortraject is onmisbaar, vereist zoals in ons voortraject aangetoond inleving/betrokkenheid van de doelgroep en idealiter een cross-disciplinaire benadering, en bepaalt in grote mate de slaagkans van het geplande sensornetwerk. Neem dan ook de tijd om deze denkoefening te maken. Onze ervaring leert dat het organiseren van enkele workshops en overlegmomenten toch al snel 2 weken in beslag neemt voor een onderzoeker en minstens 2 personen (4 mandagen/pers) van de betrokken gemeente/stad. In het minimale geval (als de onderzoeksvraag al volledig helder is en enkel vertaald moet worden naar meetopzet) dan wordt een inschatting van 3 dagen voor een onderzoeker (overleg ter plaatste, meetlocatie bekijken) en 3 dagen voor 1 pers van de gemeente (overleg en raadplegen andere diensten;..) gemaakt.

8.3. AANKOOP SENSOREN

Voor de aankoop van de sensoren valt op dat de prijs sterk varieert tussen de fabrikanten. Dit is naar onze ervaring niet altijd gerelateerd met de datakwaliteit, maar wel met configureerbare opties, functionaliteiten en/of transparantie van het systeem. Ga daarom niet enkel prijs na op basis van de functionele vereisten, maar denk ook aan bijkomende differentieerbare opties:

- Configureerbaarheid meetresolutie, kalibratieparameters,...
- Online data-analyse en interpretatietools
- Online operationele opvolging sensordata met meldingen/alerts
- ...

Er bestaan soms verschillende aankoopformules voor sensoren:

- **Leasing/huur formule** waarbij de gebruiker voor een bepaalde periode (bv. 12 of 24 maanden) gebruik kan maken van sensorboxen en data infrastructuur zonder dat de sensorboxen eigendom zijn van de gebruiker en na afloop van de gebruiksperiode terug overgemaakt worden

- **Aankoop formule** waarbij de sensorboxen eigendom worden van de gebruiker. In dit geval moet ook aan het onderhoud en kwaliteitscontrole op middellange termijn gedacht worden.
- **Groepsaankoop** waarbij een aantal gemeenten samen of via een intermediair (intercommunale, provincie) een “sensorpark” aanleggen waarvan deelnemende gemeenten gebruik kunnen maken. De kostenstructuur valt te vergelijken met de leasingformule, al kan een inleg in de initiële investering de huurkosten reduceren (co-eigenaarschap). Een belangrijk verschil met de leasingformule is de beschikbaarheid van sensoren op de middellange termijn (bv. 6 maanden campagne herhalen na 2 jaar).

Vaak wordt bovendien gebruik gemaakt van bijkomende kosten zoals **opstartkost** (set-up fee) voor levering/configuratie/kalibratie en een (maandelijks) **wederkerende kost** (subscription) voor toegang tot het online dashboard/sensordata en technische ondersteuning.

Bijkomende opties bestaan vaak uit:

- Ingebouwde sensoren (polluenten)
- Meteorologisch weerstation (vaak voor wind/neerslagdata)
- Zonnepaneel (stroomvoorziening)

Denk ten slotte ook aan **levertermijn, functionele mogelijkheden van het online dashboard (inzichten pilootstudies) en de transparantie in het type ingebouwde sensoren en kalibratiemethode van de fabrikant**. Deze eigenschappen bepalen in grote mate de maturiteit van de sensoroplossing.

Een oplistijng van criteria die best bevroegd worden bij de aanbieder wordt in §8.7 weergegeven. Voor wat betreft het kostenplaatje van sensorboxen kan de prijs sterk variëren van 500 – 5000 euro/sensorbox.

8.4. INSTALLATIE/OPVOLGING/KWALITEITSCONTROLE

De praktijkervaring leerde dat het installeren en opvolgen van de sensoren gebruiksvriendelijk en haalbaar is op gemeenteniveau. Voor de opvolging en kwaliteitscontrole kan vaak gebruik gemaakt worden van online dashboards van de sensorboxen, een meegeleverde handleiding en beperkte technische kennis. Afhankelijk van het gekozen meetsysteem zijn de mogelijkheden (foutdetectie, alarm, meldingen, configuratie) en handleiding uitgebreider.

Denk voor de **installatie** aan:

- Co-locatie (bv. 2/3 weken op VMM meetplaats) + finale meetlocatie
- Halve dag installatie + check (2 personen)
- Halve dag demontage + check (2 personen)

Denk voor de **opvolging/onderhoud** aan:

- Hou logboek bij
- Online opvolging op sensor dashboard (1 persoon): 1 uur (dagelijks/wekelijks) voor 1 persoon:
 - Komen alle data binnen?
 - Zijn er foutmeldingen?
 - Is de gemeten concentratierange realistisch (vergelijk vb met VMM metingen: <https://www.vmm.be/lucht/actuele-luchtkwaliteit>)?
- Eventuele interventies (vb schoonmaken inlaat PM sensor) ter plaatse

- Vervanging sensor bij defect of einde levenstermijn (zelf op basis van handleiding/instructies of sensor naar fabrikant sturen)
- Contactpersoon sensorfabrikant/leverancier

Indien deze taken worden uitbesteed moet toch op een kost van minimaal 5000 euro gerekend worden.

8.5. ANALYSE/VISUALISATIE/INTERPRETATIE

De mate aan technische know-how die benodigd is voor de data-analyse van je sensornetwerk is afhankelijk van de vraagstelling. Toch is het belangrijk om te beseffen dat luchtkwaliteit dynamisch is in zowel ruimte als tijd, vaak een combinatie is van verschillende bronnen en (chemische) interacties tussen pollutanten, onderhevig aan de weersomstandigheden en dat sensoren nog niet kunnen beschouwd worden als referentiemeting waardoor de onzekerheid telkens geëvalueerd dient te worden. Indien de analyse op gemeenteniveau zou gebeuren is het aangeraden om een **(lokale) expert** bij het proces te betrekken. Een rapportage kan ook afgesproken worden met de **sensorfabrikant/leverancier** of de data-analyse en interpretatie kan uitbesteed worden aan **externen** (vb VMM, VITO, Universiteit, consultant, ...). Hou er ook rekening mee dat data-analyse enkel zinvol is als onderzoeksvraag en meetopzet goed op elkaar afgestemd werden, spiegel je daarom aan goede voorbeelden of overweeg ook daar een externe expert te betrekken.

Denk bij de data-analyse aan:

- Datakwaliteit sensoren (op basis van co-locatiemetingen)
- Evalueer de gevoeligheid van sensoren ten opzichte van temperatuur en relatieve vochtigheid
- Bij lokale bijdrage studies: Normalisatie/correctie achtergrond dynamiek (door middel van achtergrondlocatie)
- Probeer zowel ruimtelijke (verschillen tussen locaties) als temporele variatie (tijdreeksen) te evalueren
- Vergelijk verkregen sensormetingen met beschikbare (nabije) referentiemetingen van VMM/Irceline
- Opmaak kaartjes en tijdreeksen van de beschikbare pollutanten

Op basis van de pilootstudies (Kampenhout en Sint-Niklaas) en eerdere sensorprojecten zal een indicatieve prijsrange voor de (wetenschappelijke) analyse van de sensordata tussen de +/- 20 000 en 30 000 liggen.

8.6. INVENTARIS PRIJS/EFFORT

Om de kosten voor het opzetten van een sensornetwerk in te schatten, kan onderstaande inventaris (Tabel 7) gebruikt worden.

Tabel 7 Inventaris van kostenposten bij de uitrol van een sensornetwerk

TAAK	PRIJS/EFFORT	EXTRA INFO
VOORTRAJECT		
Definiëren onderzoeksvraag en ecosysteem	~1 week/use case	Brainstorm VAQUUMS Vergelijkbare initiatieven
Definiëren meetopzet	~2 weken/use case	Wat is reeds beschikbaar?
Indicatieve prijsrange (indien uitbesteed): +/- 4000-18000 Incl. 3-8 mandagen voor overleg met gemeente		
AANKOOP SENSOR		
Sensor(box)	/box	Aankoop/Leasing/Huur
Opties sensorbox: - Polluenten - Zonnepaneel - Weerstation	/sensor/box /box /box	Gewenste polluenten? Stroomvoorziening? Wind/regendata nodig? Hoeveel locaties?
Enmalige opstartkost <i>Levering, configuratie, (bedrijfs)kalibratie</i>	/box	Registratie nodig of meteen online?
Wederkerende kost <i>toegang dashboard, data, technische bijstand</i>	/maand/box	Operationele opvolging in dashboard? Contactpersoon technische bijstand?
Indicatieve prijsrange: +/- 500-5000/sensorbox		
INSTALLATIE/KWALITEITSOPVOLGING/ONDERHOUD		
Co-locatie - Installatie + check - 2/3 weken looptijd - Demontage	Halve dag (2 pers) Halve dag (2 pers)	Wederkerende co-locatie nodig (afh van meetperiode)?
Finale meetlocatie - Installatie + check - Meetperiode - Demontage	Halve dag (2 pers) Halve dag (2 pers)	
Online opvolging dashboard <i>Data, foutmeldingen, range</i>	1 uur/dag of week	Efficiëntie opvolging is afhankelijk van functionaliteiten online dashboard!
Interventies ter plaatse <i>Afh van events en levensduur sensor</i>	/box	Afh van precisie dashboard, transparantie systeem en handleiding
Indicatieve prijsrange: +/- 5000		
DATA-ANALYSE & INTERPRETATIE		

Analyse data <i>Rapport datakwaliteit sensoren, meetcampagne, impact maatregel, visualisatie op kaart/tijdreeksen</i> - Gemeenteniveau (+ externe ondersteuning) - Door sensorleverancier - Volledig extern uitbesteed	~3 weken/use case (1 pers)	Analyse + rapport
Indicatieve prijsrange (indien uitbesteed): +/- 20 000 – 30 000		
COMMUNICATIE		
Feedback metingen naar doelgroep om impact te creëren	Use case afhankelijk	Afh van use case/doelgroep Verschillende communicatieconcepten: <ul style="list-style-type: none"> • Rapport • Workshop/Presentatie • Visualisatie app • Visualisatie bord • Spel vervoerskeuze • Knelpunt overzicht • Route dashboard • ... Ondersteuning van lokale expert/externe voor Q&A
Indicatieve prijsrange (indien uitbesteed): Afhankelijk van communicatieconcept		

8.7. OPLIJSTING TECHNISCHE CRITERIA VOOR BESTEK

Een oplijsting van technische criteria die kunnen nagevraagd worden potentiële sensoraanbieders wordt hieronder (Tabel 8) weergegeven. Deze lijst kan (mits aanpassing voor de concrete use case) opgenomen worden in het bestek van lokale overheden.

Tabel 8 Technische criteria voor sensorleveranciers

SPECIFICATIES SENSORSYSTEEM	
Afmetingen, gewicht en bevestigingsmethode. De maximale dimensies en gewicht zijn: vb. 55x45x35 cm en 10 kg	Afmetingen: Gewicht: Bevestigingsmethode:
Stroomvoorziening. De sensorbox moet voorzien zijn van stroomaansluiting voor netstroom geschikt voor Belgische netwerk (AC 220 V). Indien het systeem voorzien is van een batterij als back-up bij stroomuitval moet opgegeven worden hoelang het systeem data collecteert zonder stroom en of het systeem vanzelf weer opstart na een stroomonderbreking	Beschrijf stroomvoorziening Stand-alone op batterij:

Bijkomende info dient opgegeven te worden over mogelijkheden voor alternatieve stroomvoorziening (vb zonnepanelen, ...)	Alternatieve stroomvoorziening(en):
<p>Operationele condities en behuizing.</p> <p>Het systeem moet werken onder omgevingscondities voor België en minimaal tussen -10 – 40°C</p> <p>Het systeem moet zo gebouwd zijn dat het buiten gebruikt kan worden en voldoende bescherming biedt aan de regen, wind, warmte,...</p>	<p>Is systeem geschikt voor operationele condities tussen -10 – 40°C en gebouwd om onbeschermd te werken in de buitenlucht? IP certificatie? (J/N)</p> <p>Beschrijf operationele condities:</p>
<p>Meetfrequentie</p> <p>De meetfrequentie moet minstens 5 min en 10 seconden zijn voor respectievelijk vaste en mobiele toepassingen. Er dient ook opgegeven te worden wat de uitmiddelingsstijden zijn waarmee de data kunnen worden opgeslagen</p>	<p>Beschrijf de meetfrequentie en uitmiddelingsstijden</p> <p>Is uitmiding configureerbaar?</p>
<p>De sensorsystemen meten minimaal PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, NO₂, NO, T, RH (use case afhankelijk)</p> <p>De aanbieder geeft ook aan of het systeem ook nog andere parameters kan meten: O₃, CO of aantalconcentratie voor PM en wat eventueel additionele kost is hiervoor</p> <p>De aanbieder geeft ook aan of het mogelijk is windrichting te meten op 1 van de systemen en wat de bijkomende kost hiervoor is</p>	<p>Sensorsysteem meet minimaal vereiste componenten (J/N)</p> <p>Bijkomende parameters en eventueel additionele kost:</p> <p>Mogelijkheid om windrichting te meten en additionele kost:</p>
<p>Kruisgevoeligheid en drift</p> <p>De aanbieder geeft aan welk de eventuele kruisgevoeligheden zijn en drift en of het systeem hiervoor compenseert</p>	Beschrijf eventuele kruisgevoeligheid en drift en potentiële compensatie
<p>Detectielimiet</p> <p>De sensorboxen voldoen aan minimale vereisten voor detectielimiet zoals weergegeven in Error! Reference source not found. Lagere detectielimieten worden positief geëvalueerd. De aanbieder geeft de detectielimiet op die haalbaar is.</p>	Geef detectielimiet
<p>Precisie</p> <p>De sensorsystemen hebben een goede vergelijking met de referentiemeettechnieken. Dit wordt geëvalueerd op basis van de R². Alle parameters hebben een minimale R² van 0,6. De gewenste R² is weergegeven in Error! Reference source not found. hieronder.</p> <p>Het is positief als de aanbieder ook de regressieparameters geeft (intercept en helling)</p> <p>Eventuele bijkomende gegevens die precisie beschrijven mogen opgegeven worden (MAE, RMSE, expanded uncertainty).</p>	Geef R ² op (vergelijking met referentie) en eventueel bijkomende info over precisie
<p>Between-sensor uncertainty</p> <p>De between-sensor uncertainty of de verschillen tussen dezelfde sensorboxen moet zo klein mogelijk zijn</p> <p>Minimale vereisten zijn weergegeven in de Error! Reference source not found.</p>	Geef aan wat de between-sensor uncertainty is
<p>Responstijd</p> <p>De responstijd van de sensoren bedraagt minder dan 6 min (t₉₀). Een betere responstijd is positief.</p>	Geef responstijd
<p>De aanbieder kan goede resultaten voorleggen van onafhankelijke evaluaties door onafhankelijke instituten (vb AQ-SPEC, Airlab, ...), wetenschappelijke publicaties of langdurige co-locatiecampagnes van sensorsysteem met referentie-apparatuur</p>	Geef onafhankelijke evaluaties of links naar de documenten

OPERATIONELE CONDITIES EN GEBRUIK	
<p>Garantie De aanbieder moet een garantieperiode geven van minimum 2 jaar. De aanbieder moet de garantievoorwaarden beschrijven. De aanbieder geeft bij voorkeur garantie op alle onderdelen en beschrijft expliciet indien er onderdelen zijn die niet onder garantie vallen</p>	Beschrijf garantie
<p>Het systeem heeft bij voorkeur lange levensduur De aanbieder moet aangeven wat de levensduur is van de verschillende componenten en van het volledige sensorsysteem. De aanbieder moet aangeven wat de geschatte tijd is om de sensoren te vervangen en de procedure omschrijven</p>	Beschrijf levensduur + vervanging sensoren
<p>Mogelijkheid tot vervanging van onderdelen De inschrijver moet opgeven welke onderdelen mogelijk vervangen kunnen en/of moeten worden en ook een inschatting van de kost van elk van de onderdelen</p>	Onderdelen en kostprijs
<p>Onderhoud en interventies. De inschrijver moet aangeven wat het onderhoud is dat moet gebeuren (o.a. kalibraties, kwaliteitscontrole vervangen van onderdelen, reinigen van onderdelen,...) evenals de frequentie en gerelateerde kosten voor dit onderhoud wanneer niet in garantie vervat zit of buiten de periode van 2 jaar valt.</p>	Onderhoud en interventies beschrijven en inschatting kost
<p>Kwaliteitscontrole Het sensorsysteem beschikt over een kwaliteitscontrole dat aangeeft wanneer bepaalde sensoren defect/offline zijn of foute metingen rapporteren, alsook wanneer herkalibratie nodig is. De inschrijver beschrijft zijn kwaliteitscontrolesysteem</p>	Kwaliteitscontrole aanwezig (J/N) Beschrijf de QA/QC procedures
DATA	
<p>Datacommunicatie, externe dataopslag, en mogelijkheid tot doorsturen van data naar eigen dataplatform. Worden data real-time doorgestuurd naar de database? Beschrijf hoe de data van de sensorbox worden doorgestuurd; beschrijf het protocol dat gebruikt wordt voor de datacommunicatie: bekabeld (ethernet), draadloos (WIFI, GSM, LORA). Beschrijf waar de doorgestuurde data worden opgeslagen. Beschrijf eventuele bijkomende kosten voor data opslag Kunnen de data worden opgevraagd en doorgestuurd naar een eigen dataplatform? Beschrijf hoe deze data kunnen worden opgevraagd en doorgestuurd naar eigen dataplatform (beschrijf het dataformaat)</p>	<p>Is data-communicatie voorzien om data van sensorbox naar externe database door te sturen J/N; Beschrijf communicatieprotocol(len) en frequentie</p> <p>Is externe dataopslag voorzien? (J/N)</p> <p>Kan de data worden opgevraagd/doorgestuurd naar eigen dataplatform?</p>
<p>Data visualisatie Een minimale visualisatie moet beschikbaar zijn waarop data getoond worden. Is data van de sensoren beschikbaar via een eenvoudig toegankelijk platform waarbij de data op een eenvoudige manier (minimaal tijdsreeksen) gevisualiseerd wordt en foutmeldingen van de sensoren getoond worden? Beschrijf eventuele bijkomende kosten voor gebruik van visualisatietool</p>	Beschrijf visualisatie en geef afbeelding
<p>Data: databehandeling, dataclassificatie en eenheden De eenheden waarin de data minimaal moeten worden weergegeven zijn weergegeven in Error! Reference source not found.. De resultaten van</p>	Zijn de data weergegeven als concentraties (J/N)

<p>de gas- en PM sensormetingen worden in concentraties weergegeven. De ruwe sensorsignalen worden omgezet in gekalibreerde concentraties.</p> <p>Verschillende dataniveaus kunnen weergegeven worden (vb ruwe data en gekalibreerde data). De inschrijver geeft aan welke dataniveaus beschikbaar zijn (vb ruwe data, gekalibreerde data met verschillende niveaus van kalibratiemodellen, ...).</p> <p>Beschrijf hoe kalibratie gebeurt: Real-time of op basis van voorafgaande veld/labokalibratie? Kalibratiemodel enkel gebaseerd op parameters van on-board sensoren (level 1-2A zoals beschreven in Schneiders et al. 2019⁴) of op basis van externe databronnen (vb referentiemetingen).</p>	<p>Welke dataniveaus (ruw/gekalibreerd) zijn beschikbaar?</p> <p>Beschrijf kalibratie: Real-time of op basis van voorafgaande kalibratie? Op basis van sensordata of externe data?</p>
<p>Interne dataopslag Geef aan of data kan worden opgeslagen in het toestel (als back-up bij eventuele data-communicatiestoring). De inschrijver moet beschrijven hoe lang data in het toestel kan worden opgeslagen (in geval van communicatieverlies)</p>	<p>Lokale dataopslag (J/N) Beschrijf hoe lang</p>
<p>Handleiding De inschrijver heeft een duidelijke handleiding die onder andere installatie, kalibratie, eenvoudige interventies, data transfer en visualisatie,... beschrijft</p>	<p>Voorzie handleiding</p>
KOSTPRIJS	
<p>Kostprijs Geef de kostprijs op per sensorsysteem (inclusief PM_{2.5}, PM₁₀, PM₁, NO₂, NO T, RH) Geef de kostprijs op voor bijkomende parameters (NO, O₃, PNC, windrichting,...) per sensorsysteem (indien deze beschikbaar zijn)</p> <p>Geef bijkomende (licentie)kosten op voor gebruik van systeem, dataopslag, visualisatiedashboard, ...</p> <p>Geef een schatting van operationele kost (onderhoud, vervangen sensoren, kalibratie) gedurende het eerste jaar (indien niet vervat in bovenstaande)</p>	<p>Geef kostprijs volgens gevraagd detail:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sensorbox - Licenties - Operationele kost/jaar
LEVERTERMIJN	
<p>Levertermijn</p>	<p>Geef levertermijn</p>

⁴ Schneider, P., A. Bartonova, N. Castell et al (2019). Toward a Unified Terminology of Processing Levels for Low-Cost Air-Quality Sensors. Environmental Science & Technology, 2019, 53, 15, 8485-8487.

Tabel 9 Vereiste eenheden waarin de data worden weergegeven

	EENHEDEN	OPMERKING
PM ₁ ; PM _{2.5} ; PM ₁₀	µg/m ³	
NO ₂	µg/m ³	ppb is ook aanvaardbaar
Temperatuur	°C	
RH	%	
Bijkomende parameters:		
O ₃ , NO	µg/m ³	ppb is ook aanvaardbaar
CO	mg/m ³	ppm is ook aanvaardbaar
PM ₁	µg/m ³	
PNC (aantalconcentratie PM)	Aantal deeltjes/cm ³	Geef eventuele opsplitsing in aantal bins op
Atmosferische druk	mbar of hPa	

Tabel 10 Performantiecriteriën

PARAMETER	MEETBEREIK (minimum)	AANBEVOLEN R ² (obv uurlijkse waarden)	DETECTIELIMIET	BETWEEN-SENSOR UNCERTAINTY (%)
PM _{2.5} , PM ₁	0-1000 µg/m ³	0,8	3 µg/m ³	15%
PM ₁₀	0-1500 µg/m ³	0,7	5 µg/m ³	15%
NO ₂	0-600 µg/m ³	0,8	10 µg/m ³	10%
NO	0-2000 µg/m ³	0,7	7 µg/m ³	15%
O ₃	0-600 µg/m ³	0,8	10 µg/m ³	10%
CO	0-10 mg/m ³	0,8	100 mg/m ³	10%
PNC	0-500000 aantal/cm ³	Nvt		
pressure	900-1200 mbar	Nvt	Nvt	Nvt
T	-20 – 45 °C	Nvt	Nvt	Nvt
RH	0-100 %	Nvt	Nvt	Nvt

LITERATUURLIJST

1. Hofman, J.; Panzica La Manna, V.; Muylaert, J. *Measuring and Modeling Air Quality in Smart Cities*; IMEC: 2021.
2. VMM, VAQUUMS Air Quality Sensor Roadmap. In VMM: 2021.
3. Peters, J.; Van Poppel, M. *LITERATUURSTUDIE, MARKTONDERZOEK EN MULTICRITERIA-ANALYSE BETREFFENDE LUCHTKWALITEITSSENSOREN EN SENSORBOXEN*; VITO: 2020.
4. Berghs, J. *IoT network comparison*; IDLab: 2019.
5. Peters, J.; Van Poppel, M.; Hofman, J.; Baeyens, B.; Van Laer, J.; Spruyt, M. *Uitrollen van een sensornetwerk voor luchtkwaliteitsmetingen in 2 pilootprojecten en de bijhorende visualisatie van de meetresultaten: Globale analyse van de resultaten en beoordeling van de testopstelling*; VITO: 2021.
6. VMM, Infografiek houtverbranding 2020. In 2020.
7. Polidori, A. *AQ-SPEC Field Setup and Testing Evaluation Protocol*; AQ-SPEC: 2017, 2017.
8. Williams, R.; Duvall, R.; Kilaru, V.; Hagler, G.; Hassinger, L.; Benedict, K.; Rice, J.; Kaufman, A.; Judge, R.; Pierce, G.; Allen, G.; Bergin, M.; Cohen, R. C.; Fransioli, P.; Gerboles, M.; Habre, R.; Hannigan, M.; Jack, D.; Louie, P.; Martin, N. A.; Penza, M.; Polidori, A.; Subramanian, R.; Ray, K.; Schauer, J.; Seto, E.; Thurston, G.; Turner, J.; Wexler, A. S.; Ning, Z., Deliberating performance targets workshop: Potential paths for emerging PM_{2.5} and O₃ air sensor progress. *Atmospheric Environment: X* **2019**, *2*, 100031.
9. Austin, E.; Novosselov, I.; Seto, E.; Yost, M. G., Laboratory Evaluation of the Shinyei PPD42NS Low-Cost Particulate Matter Sensor. *PLoS ONE* **2015**, *10*, (9), e0137789.
10. Karagulian, F.; Barbieri, M.; Kotsev, A.; Spinelle, L.; Gerboles, M.; Lagler, F.; Redon, N.; Crunaire, S.; Borowiak, A., Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring. *Atmosphere* **2019**, *10*, (9), 506.
11. Fishbain, B.; Lerner, U.; Castell, N.; Cole-Hunter, T.; Popoola, O.; Broday, D. M.; Iñiguez, T. M.; Nieuwenhuijsen, M.; Jovasevic-Stojanovic, M.; Topalovic, D.; Jones, R. L.; Galea, K. S.; Etzion, Y.; Kizel, F.; Golumbic, Y. N.; Baram-Tsabari, A.; Yacobi, T.; Drahtler, D.; Robinson, J. A.; Kocman, D.; Horvat, M.; Svecova, V.; Arpaci, A.; Bartonova, A., An evaluation tool kit of air quality micro-sensing units. *Sci Total Environ* **2016**, *575*, 639-648.
12. Spinelle, L.; Alexandre, M.; Gerboles, M. *Protocol of evaluation and calibration of low-cost gas sensors for the monitoring of air pollution*; Joint Research Centre (JRC): 2013.
13. RIVM Kalibratie van fijnstofsensoren. <https://www.samenmetenaanluchtkwaliteit.nl/dataportaal/kalibratie-van-fijnstofsensoren> (9/12/2021),
14. Hofman, J.; Nikolaou, M.; Shantharam, S. P.; Stroobants, C.; Weijs, S.; La Manna, V. P., Distant calibration of low-cost PM and NO₂ sensors; evidence from multiple sensor testbeds. *Atmos Pollut Res* **2022**, *13*, (1), 101246.
15. Cui, H.; Zhang, L.; Li, W.; Yuan, Z.; Wu, M.; Wang, C.; Ma, J.; Li, Y., A new calibration system for low-cost Sensor Network in air pollution monitoring. *Atmos Pollut Res* **2021**.
16. De Vito, S.; Di Francia, G.; Esposito, E.; Ferlito, S.; Formisano, F.; Massera, E., Adaptive machine learning strategies for network calibration of IoT smart air quality monitoring devices. *Pattern Recognit Lett* **2020**, *136*, 264-271.
17. van Zoest, V.; Osei, F. B.; Stein, A.; Hoek, G., Calibration of low-cost NO₂ sensors in an urban air quality network. *Atmospheric environment* **2019**, *210*, 66-75.