

Auteurs

Atze Boerstra, bba binnenmilieu, Den Haag; Arjen Raue, bba binnenmilieu, Den Haag, RESET Accredited Professional; Louie Cheng, PureLiving China, Shanghai, RESET Accredited Professional;

Slimme monitoring van gebouwprestaties met binnenmilieu-sensornetwerken

Nu sensoren voor luchtkwaliteit steeds nauwkeuriger en goedkoper worden, is er ook meer belangstelling voor doorlopende monitoring van het binnenmilieu. Met geavanceerde sensornetwerken kunnen we de binnenmilieuprestatie van gebouwen steeds beter in de gaten houden. Ook door toenemende maatschappelijke belangstelling voor de beheersing van fijnstof neemt de belangstelling voor deze technologie toe. Dit artikel gaat in op een paar fundamentele vragen die te maken hebben met de grootschalige toepassing van binnenmilieusensornetwerken.

Serie over luchtkwaliteit-monitoring

Dit is deel 2 in een serie artikelen, verzorgd door bba binnenmilieu, over luchtkwaliteit-monitoring in gebouwen d.m.v. online sensornetwerken. Het artikel verscheen eerder in het Engels in REHVA Journal.

Online sensornetwerken hebben de toekomst. De maatschappelijke belangstelling voor de gezondheidseffecten van onvoldoende luchtkwaliteit groeit. Er is bijvoorbeeld steeds meer bekend over de schadelijke effecten van fijnstof en ultrafijnstof in het binnenmilieu. Ondertussen maken Internet of Things en steeds betrouwbaardere sensoren het mogelijk om verschillende parameters voortdurend te monitoren via online sensornetwerken. De kosten van zulke netwerken dalen snel. Sensornetwerken passen bovendien bij de eisen die internationale certificeringsmethoden zoals WELL en RESET stellen aan (de monitoring van) het binnenmilieu. bba volgt deze ontwikkelingen op de voet en heeft al verschillende projecten uitgevoerd met online-sensornetwerken in binnen- en buitenland.

Om sensornetwerken succesvol toe te passen heb je meer nodig dan betrouwbare sensoren. Het is belangrijk een duidelijke visie te hebben van wat je wilt meten, waarom, waar en hoe. Een algemene methodologie is nodig om de enorme datastroom van zo'n sensornetwerk te verwerken tot informatie die gebouwgebruikers en decision makers werkelijk iets zegt. In dit artikel behandelen we een paar essentiële aandachtspunten op basis van onze eigen ervaringen met verschillende soorten sensornetwerken, aangevuld met wat de literatuur hierover zegt. Onze bevindingen kunnen helpen bij de verdere ontwikkeling van binnenmilieusensornetwerken, zowel voor onderzoek als voor praktische toepassingen zoals prestatietoetsing bij DBFMO-contracten (design, build, finance, maintain and operate).

Dit artikel is deels gebaseerd op een paper van Atze Boerstra voor het AIVC-congres in 2018. Bovendien kan het worden beschouwd als een vervolg op het artikel van Louie Cheng in het REHVA Journal van juni 2017.

Achtergronden

De technologie van luchtkwaliteitssensoren is de afgelopen jaren enorm verbeterd. Ze worden steeds kleiner, betrouwbaarder, nauwkeuriger en betaalbaarder. Inmiddels leveren verschillende fabrikanten fijnstofsensoren (PM_{2,5}) van professionele kwaliteit, die niet groter zijn dan een luciferdoosje. Tegelijkertijd heeft Internet of Things-technologie (IoT) een hoge vlucht genomen. Hierdoor is het steeds eenvoudiger ad hoc sensornetwerken op te zetten met draadloze binnenmilieumonitors. Je kunt tegenwoordig van achter je bureau het binnenmilieu in meerdere ruimten in meerdere gebouwen in de gaten houden via online platforms die voortdurend nieuwe data van de sensoren ontvangen, als je wilt zelfs elke seconde. Zie bijvoorbeeld Guiyot et al. [1] voor meer achtergrondinformatie.

Door het toenemende maatschappelijk bewustzijn over de gezondheidseffecten van met name fijnstof neemt ook de vraag naar zulke monitoringnetwerken toe. Bekende fabrikanten van consumentenelektronica bieden goedkope huis, tuin en keuken-apparaten aan, kennelijk omdat zij een markt zien voor luchtkwaliteitsmonitoring



Figuur 1: Testlocatie monitors op het kantoor van bba binnenmilieu.

thuis. Hiermee neemt ook vanuit de gebouwgebruikers de vraag naar zulke monitors toe. Er zijn overigens nog geen goedkope sensoren voor ultrafijnstof op de markt, hoewel ook over dit aspect steeds meer bezorgdheid heerst [8].

Sommige kwaliteitsclassificatieprogramma's voor gebouwen, zoals WELL, stellen eisen aan luchtkwaliteitsmonitoring [2]. Het uit China afkomstige RESET-programma [3] biedt een kader voor zulke monitoring met o.a. gestandaardiseerde meetmethoden, eisen aan meetapparatuur en een opleidings- en accreditatiesysteem voor RESET Accredited Professionals. Op het moment zijn er al zo'n tien verschillende RESET-goedgekeurde monitors op de markt en wereldwijd circa 330 RESET Accredited Professionals, waarvan twee in Nederland, waaronder één van de auteurs. In tegenstelling tot WELL en LEED richt RESET zich uitsluitend op (de monitoring en communicatie van) luchtkwaliteit.

Elke adviseur die een online sensornetwerk wil opzetten zal worden geconfronteerd met een aantal kwesties, die elk moeten worden opgelost. Dit artikel bespreekt een aantal van deze overwegingen, vooral de meer generieke. Deze overwegingen vloeien deels voort uit onze eigen ervaring (zie Figuur 1), deels uit een workshop gehouden op de NCEUB Windsor Conference 2018 [4].

Meerwaarde

De eerste vraag is: wat is de meerwaarde van het meten met een sensornetwerk tegenover de bekende momentane handheld-metingen? Monitors zijn van cruciaal belang voor het analyseren van een Indoor Air kwaliteit (IAQ) probleem, waarna passende maatregelen kunnen worden genomen. Voorheen moesten facility managers of gebouwgebruikers lange en diepgaande audits met handbediende deeltjestellers uitvoeren om te bepalen of er een probleem is. Echter, tegenwoordig stelt continue monitoring van het binnenmilieu ons in staat om snel, goedkoop en duidelijk de gezondheidsprestaties van een ruimte in kaart te brengen.

Er is groeiende belangstelling voor het valideren van prestaties. In China was in 2015 de uitdrukking "PM_{2,5}" de vierde meest gezochte term op internet (volgens Baidu.com). Met de algemene beschikbaarheid van goedkope IEQ-monitors (al te koop vanaf US \$40), is het voor werknemers en huurders eenvoudig geworden om hun huizen en kantoren in de gaten te houden. Als ze problemen ontdekken, zullen ze meestal de informatie op sociale media delen of anders hun managers, facility managers of onderhoudsbedrijf aanspreken. Dit kan een PR-nachtmerrie of een marketing-, verkoop-, en wervingsmogelijkheid zijn.

Monitoring van het binnenmilieu maakt zelf-auditing mogelijk en draagt bij aan certificering zoals BREEAM, LEED en WELL. Sommige klanten willen het return on investment (ROI) van hun projecten weten om de meerkosten van een gezond gebouw te rechtvaardigen. Ze kunnen ook hun gebouw of kantoorruimte in de loop van de tijd op een hoger niveau laten presteren. Meubilair, afwerkmaterialen, dichtheid van werkplekken, (schoonmaak-)onderhoud, luchtverversing en de bewonersactiviteit zijn allemaal actoren die de luchtkwaliteit beïnvloeden na de inbedrijfstelling. Een neven-effect van luchtkwaliteitsmonitoring is dat de gebouwbeheerder zich meer betrokken voelt bij de dagelijkse verzorging van het binnenmilieu, omdat er nu een terugkoppeling is die oorzaak en gevolg inzichtelijk maakt.

Bovendien helpt monitoring bij optimalisatie en automatisering van het klimaatsysteem. Data-gestuurde regeling van ventilatie-, verwarmings- en koelinrichtingen kan een zeer effectieve manier zijn om de algehele gebouw- en systeemprestaties te verbeteren.

Te meten parameters

De tweede vraag is dan: welke IAQ- en thermische parameters moeten worden bewaakt met het sensornetwerk en op welk prestatieniveau? Voor gematigde omgevingen (zoals op de meeste Europese locaties) beschouwen we fijnstof (PM_{2,5}), koolstofdioxide (CO₂) en temperatuur de belangrijkste parameters die binnenshuis

moeten worden bewaakt. Sommige monitors bevatten ook een sensor voor totale vluchtige organische verbindingen (TVOC), maar onze ervaring is dat TVOC-niveaus binnen meestal nauwelijks boven de detectieniveaus van deze sensoren uitkomen. TVOC-sensoren kunnen handig zijn in specifieke situaties waar hogere niveaus worden verwacht, zoals in werkplaatsen en industriële omgevingen.

Er komen ook monitoren met real-time formaldehyde-sensoren op de markt, hoewel de consensus is dat deze nog niet betrouwbaar genoeg zijn. Wat stikstofdioxide-sensoren betreft (relevant bijvoorbeeld op een locatie met bovengemiddelde luchtverontreiniging buiten): ook deze zijn nog niet zo betaalbaar en betrouwbaar als bijvoorbeeld fijnstof- en kooldioxidesensoren.

PM_{2,5}-sensoren moeten direct de deeltjesaantalconcentraties meten, niet indirect op basis van massaconcentraties. Omdat de bronnen van fijnstof per locatie verschillen, zou een monitor moeten worden gebruikt met een instelbare k-factor (omrekenfactor) om de conversie naar deeltjesaantalconcentraties te maken.

Hoewel het meten van temperaturen eenvoudig lijkt, komen we veel onnauwkeurige IEQ-monitoren tegen, met een afwijking tot 2K in off the shelf-apparaten. Dit kan worden veroorzaakt door warmteproductie van andere componenten binnen de apparaten, bijvoorbeeld de ventilatoren van de luchtkwaliteitssensoren.

Wie geen sensorprofessional is, kan "pre-gecertificeerde" monitors van derden gebruiken. Bijvoorbeeld RESET is een systeem van derden dat specifieke criteria vaststelt voor de kwalificaties A (Professional), B (Building-grade) en C (Consumer).

Sommige fabrikanten hebben ook monitors geproduceerd die geluids- en lichtsensoren bevatten. Dit is iets waar we in dit artikel niet verder op ingaan, want het gaat hier vooral om de bewaking van het binnenklimaat.

De laatste tijd zijn er ook monitors op de markt gekomen voor montage in luchtkanalen. Daarmee kan ook in core-and-shell-gebouwen een sensornetwerk worden ingebouwd, zonder dat de verdiepingsindelingen al zijn gemaakt.

Sensorselectie

Vraag nr. 3 is: hoe selecteer je de sensoren, rekening houdend met aspecten als meetbereik, nauwkeurigheid en zelfkalibratie. Sensoren moeten geschikt zijn voor het beoogde doel. De meeste sensoren hebben een periodieke kalibratie nodig, bijvoorbeeld een keer per jaar, terwijl andere sensoren wegwerpkoppen hebben die periodiek vervangen moeten worden. Er zijn tal van apparaten op de markt en het kan moeilijk zijn om de juiste te kiezen (beste prijs/kwaliteitverhouding). Welke de beste in een specifieke situatie is, hangt natuurlijk ook af van de gevraagde nauwkeurigheid en bijvoorbeeld het budget. RESET [3] heeft een beperkt aantal gecombineerde sensor-apparaten (monitors) getest en goedgekeurd die als nauwkeurig genoeg worden beschouwd, d.w.z.: van B-klasse (professionele, maar niet laboratorium-klasse) kwaliteit.

Het meetbereik is een ander belangrijk aspect bij het selecteren van sensoren. In Tabel 1 worden aanbevolen meetbereiken beschreven voor sensoren die bedoeld zijn voor niet-industrieel gebruik binnenshuis.

Tabel 1: Selectieparameters [5]

IAQ-parameter	Veelgebruikte sensortechnologie	Aanbevolen meetbereik (klasse B)	Selectie-opmerkingen
Fijnstof (PM)	Optische deeltjestellers (OPC)	0 – 300 µg/m ³	Sensoren moeten deeltjesconcentratie kunnen meten, niet alleen massaconcentratie. Kritische overwegingen: vochtigheidscompensatie, stabiliteit, herhaalbaarheid, langetermijn-nauwkeurigheid. Meting van PM _{2,5} of PM ₁ heeft de voorkeur boven meting van bijvoorbeeld PM ₁₀ , omdat de kleinere deeltjes relevanter zijn voor de gezondheid.
Koolstof dioxide (CO ₂)	NDIR's	0 – 2000 ppm	CO ₂ is een indicator van de hoeveelheid bio-effluënten in de lucht en maakt het mogelijk om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te beoordelen. Dit is meestal de belangrijkste parameter voor IAQ-gerelateerde symptomen. Selecteer sensoren die auto-zeroing functies hebben en die kunnen worden vervangen in het veld.
Totale vluchtige organische stoffen (TVOC)	Metaaloxide sensoren (MOS); Foto-ionisatie detectoren (PID)	0,15 – 2,00 mg/m ³	Zowel MOS-als PID-sensoren zijn alleen indicatief en worden voornamelijk gebruikt om relatieve verandering te bepalen. Ze zullen meestal flink afwijken van lab-testen. Hoge chemische niveaus zullen ook herkalibratie vereisen.
Temperatuur	Thermokoppels; Temperatuurgevoelige weerstanden (thermistors); Silicium diodes	0 – 50 °C	Veel IEQ-monitoren lijden aan onnauwkeurigheid als gevolg van warmte die door nabijgelegen componenten op dezelfde PCB wordt gegenereerd.
Relatieve vochtigheid	Capacitieve dunnefilmsensoren	20 – 90%	Algemeen: veld vervangbaar. Belangrijk om te meten als gevolg van de impact van vochtigheid op metingen van andere parameters (bijv. fijnstof).
Formaldehyde	Colorimetrische, elektrochemische; Chemische sensoren	0,03 – 0,3 mg/m ³	Op dit moment zijn er geen real-time technologieën bekend bij de auteurs die betrouwbaar overeenkomen met labanalyse.

IAQ-parameter	Grenswaarde (24h gemiddeld)	
	Aanvaardbaar	Hoge prestaties
Fijnstof (PM _{2,5})	< 35 µg/m ³	< 12 µg/m ³
Totale vluchtige organische stoffen (TVOC)	< 500 µg/m ³	< 400 µg/m ³
Koolstof dioxide (CO ₂)	< 1000 ppm	< 600 ppm
Koolmonoxide (CO)	< 9 ppm	-
Formaldehyde (HCOH)	-.**	-.**

Tabel 2: Voorgestelde drempelwaarden volgens RESET [3]

* CO-sensoren zijn alleen nodig in ruimten met verbrandingsapparaten

** nog geen eisen vastgesteld

Drempelwaarden en uitkomstvisualisatie

Een andere vraag is: welke drempelwaarden moeten worden aangehouden en hoe moeten de meetresultaten grafisch worden weergegeven, zodat gebruikers begrijpen hoe (on)gezond of (on)comfortabel hun binnenklimaat is? De Wereldgezondheidsorganisatie en bijvoorbeeld de Europese Commissie geven grenswaarden voor de luchtkwaliteit [6, 7]. Er kunnen echter speciale waarden van toepassing zijn voor een specifiek land, branche, of organisatie. Bovendien kunnen de arbeidsomstandigheden-richtlijnen criteria voor specifieke werksituaties hebben. RESET [3] heeft ook specifieke drempelniveaus gedefinieerd, vooral voor parameters voor binnenluchtkwaliteit, Zie Tabel 2.

RESET heeft zowel reguliere als high performance categorieën van certificering. De laatste heeft eisen die nog strenger zijn voor PM_{2,5} dan LEED v4 of bijvoorbeeld WELL.

Ook kunnen sommigen beweren dat in plaats van absolute grenswaarden (concentraties) als drempelwaarden meetresultaten (zoals luchtkwaliteit) moeten worden beoordeeld in termen van maximaal toelaatbare binnen-buiten (I/O) verhoudingen (gemeten binnenconcentratie gedeeld door momentane buitenconcentratie).

Bij de presentatie van de monitoringresultaten moeten ernstige gezondheidsbedreigende situaties worden onderscheiden van resultaten die op het eerste gezicht alarmerend lijken, zoals incidentele overschrijding van een drempelwaarde die was bedoeld als grens voor langdurige blootstelling. We willen immers dat de bewoners van het gebouw alleen worden gealarmeerd bij echte gevaren.

De weergave van (continue) meetresultaten (bijv. via een speciaal IEQ-platform) heeft normaalgesproken een dui-

delijke kleurcodering. De kleur groen wordt bijvoorbeeld gebruikt om de niet-schadelijke verontreinigingsniveaus aan te duiden, rood om schadelijke verontreinigingsniveaus en oranje of geel wanneer de blootstellingsniveaus tussen die twee in liggen.

Indoor-Outdoor ratio

Een andere kwestie voordat een sensornetwerk kan worden ingezet: is het alleen nodig om binnenshuis op verschillende locaties de luchtkwaliteit en temperatuur te meten, of ook buiten?

Luchtmeetnet.nl geeft openbaar toegankelijke gegevens van geavanceerde buitenmeetstations. Dit kan een uitstekende bron van gegevens zijn, o.a. voor lokale PM_{2,5}-concentraties. Soms meten de lokale buitenstations echter niet wat men nodig heeft (bijv. alleen PM₁₀ en niet PM_{2,5}). Ook zijn de buitenstations soms gewoon te ver weg van het gebouw dat wordt onderzocht (meer dan 10 km bijvoorbeeld). En wanneer een gebouw zeer dicht bij bijvoorbeeld een sterk vervuilende bron ligt, zoals een fabriek aan een drukke weg, is de lokale blootstelling anders dan wat een nabijgelegen weerstation van de stad of het buitengebied meet.

Daarom is het vaak zinvol om ook externe sensoren voor luchtkwaliteit en buitentemperatuur op te nemen bij een IEQ-sensornetwerk voor een gebouw. De buitensensoren kunnen op het dak worden geplaatst (afgeschermd van regen en direct zonlicht), of in het buitenluchtkanaal naar de LBK.

Een groot voordeel van ook het meten van de buitenconcentraties met dezelfde apparaten is dat je de indoor-outdoor (I/O) ratio voor alle binnenluchtkwaliteitsparameters redelijk betrouwbaar kunt berekenen. Tegelijkertijd kan het zinvol zijn om bijvoorbeeld gemeten binnentemperaturen te relateren aan het momentane buitenklimaat (bijv. dagelijkse maximumtemperatuur).

Aantal sensoren en locatie

Hoeveel sensoren moet je gebruiken? En waar plaats je de sensoren?

Het is uiteraard niet zinvol om één sensor te installeren in een gebouw met duizend gebruikers. Maar hoeveel heb je er minimaal wél nodig? Sensoren en monitors worden steeds betaalbaarder, waardoor de inzet van een substantieel aantal steeds haalbaarder wordt. Aan de andere kant: het aanbrengen van een monitor in elke ruimte van een gebouw is in het algemeen niet nodig.

In de regel is één monitor per 500 m² van het bruikbaar vloeroppervlak voldoende. Bovendien ten minste één sensor per ruimtefunctie (bijv. kantoorruimte versus vergaderruimte versus laboratoriumruimte). Dit is in lijn met de RESET-vereisten [3].

Ook moet de locatie/positie voor de sensoren worden bepaald. Idealiter is een locatie zo dicht mogelijk bij waar mensen het grootste deel van de tijd zitten, staan of liggen. In een kantoorgebouw bijvoorbeeld betekent dit dat sensoren op het bureau van de mensen worden geplaatst, indien mogelijk op neushoogte (1 tot 1,20 m boven de vloer). Als dit niet mogelijk is, is het alternatief een locatie op een nabijgelegen muur (bijv. naast een wandthermostaat). Als ook dit niet mogelijk is, blijft een positie onder het plafond over als laatste optie. Posities in het plafondplenum of bijvoorbeeld in ventilatiekanalen moeten worden vermeden, omdat dit zal leiden tot ontoereikende schattingen van de blootstelling van de bewoner, tenzij het doel is om de prestaties van het ventilatiesysteem te meten.

Sensorconnectiviteit

Een belangrijke vraag is verder: hoe verbind je de monitors met de cloud?

Over het algemeen zijn monitors beschikbaar met Wi-Fi, Ethernet of seriële verbindingen voor datacommunicatie. Deze kunnen prima zijn voor

permanente installaties. Maar in niet-permanente situaties waarin een externe partij de monitors tijdelijk opstelt, zal de cliënt vaak verbieden dat het lokale Ethernet-of Wi-Fi-netwerk wordt gebruikt. In deze gevallen is een eigen ad hoc Wi-Fi-netwerk de eenvoudigste oplossing, met één internettoegangspunt dat de verzamelde gegevens van meerdere Wi-Fi gekoppelde monitoren doorstuurt naar de Cloud, met behulp van het mobiele telefoonnetwerk. Een andere optie is een gedecentraliseerd netwerk, waarbij elke monitor zijn eigen SIM-kaart heeft. Deze technologie is echter nog niet breed verspreid. Gegevens worden verzameld op een centrale server en zijn toegankelijk via een online portal.

Andere aspecten

Een belangrijk aspect dat vaak wordt vergeten is privacy. Sensornetwerken moeten zo worden ingezet dat gevoelige informatie wordt behandeld in overeenstemming met bijvoorbeeld de Europese algemene verordening gegevensbescherming (AVG). Afgezien daarvan moet men zich realiseren dat "technische gegevens" zoals gemeten CO₂-concentraties binnenshuis in feite informeren over de vraag of mensen aanwezig zijn of niet (bijvoorbeeld in een woning). Criminelen en hackers kunnen wellicht zeer geïnteresseerd zijn in dit soort gegevens, dus sensornetwerken moeten worden ontworpen en gebruikt met niet alleen privacy, maar ook veiligheid in het achterhoofd.

Een ander vaak vergeten aspect is de interfacekwaliteit. Gegevens die met IEQ-sensornetwerken worden verzameld, worden vaak op een niet-

Figuur 2: Voorbeeld van presentatie sensorgegevens via interface.

Bron: QLEAR Building Performance cloud platform – www.qlear.io



Figuur 3: In de centrale hal van DGMR in Den Haag worden op een display de meetresultaten weergegeven van 9 monitors in het gebouw. Foto: bba binnenmilieu.



optimale manier via een website, mobiele app of wandapparaten gepresenteerd. Denk hierbij aan overcomplexe of zelfs irrelevante grafieken en infographics.

Men moet het algemene systeem zodanig ontwerpen dat gegevens inderdaad in informatie worden omgezet. Leg uit (grafisch) wat het betekent wanneer bijvoorbeeld de CO₂-concentratie een groot deel van de tijd boven een bepaalde grenswaarde ligt. Figuur 2 geeft een voorbeeld van het grafisch weergeven van PM_{2,5}-concentraties binnen en buiten. In dit voorbeelddiagram wordt de RESET-drempelwaarde aangegeven, worden de gemiddelde en piekwaarden samengevat en worden de niet-werkuren gemaskeerd.

Zorg ervoor dat eindgebruikers intuïtief de verstrekte informatie begrijpen en laat niet-technische mensen de interfaces uitproberen voordat ze officieel worden gelanceerd. Het laatste wat we nodig hebben is high-tech sensornetwerken die allerlei relevante parameters meten, maar die gegevens produceren die niemand kan vertalen/begrijpen.

Een laatste aspect dat vaak over het hoofd wordt gezien is de algehele robuustheid van het sensornetwerk. Denk in dit verband aan vragen als: hoe goed zal het systeem op langere termijn blijven functioneren? Werken alle sensoren na bijvoorbeeld één jaar nog steeds? Is het noodzakelijk om onderdelen elke maand of elk jaar of over een periode van 5 jaar te vervangen? Komt er een melding wanneer er problemen zijn met de sensor? Is iemand verantwoordelijk voor periodiek onderhoud en periodieke kwaliteitscontroles?

Conclusies

Er zijn veel overwegingen met betrekking tot de implementatie van IEQ-sensornetwerken. Vooral adequate, continue meting van de parameters voor binnenluchtkwaliteit is nog steeds een hele uitdaging. Bij het ontwerpen en toepassen van zulke sensornetwerken moeten verschillende aspecten worden overwogen:

- toegevoegde waarde van het netwerk voor de gebouwgebruikers (en de betekenis van de verzamelde gegevens);
- welke parameters meet je (bv. alleen CO₂ of ook fijnstof en vluchtige organische stoffen);
- welke grenswaarden moeten worden gebruikt en hoe worden meetresultaten aan deze grenswaarden gerelateerd;
- gelijktijdige meting van (lokale) buitenparameters;
- nauwkeurigheid, meetbereik, zelfkalibratie en robuustheid van sensorcomponenten;
- implementatiestrategie, aantal monitors per verdieping en locatie van de monitors in de kamers;
- connectiviteit (Wi-Fi versus ethernet enz).

De overwegingen in dit artikel kunnen worden gebruikt om IEQ-sensornetwerken in het veld te implementeren. Die op hun beurt zullen helpen om de prestaties van gebouwen en klimaatinstallaties te objectiveren.

Referenties

1. G. Guyot, M.H. Sherman, I.S. Walker, J.D. Clark, 2017. Residential smart ventilation: a review. Lawrence Berkeley Lab, Berkeley (CA), USA. Online beschikbaar via: <http://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/lbnl-2001056.pdf>
2. IWBI, 2018. WELL Building standard v2 (alleen online). International WELL Building Institute, New York (NY), USA. Online beschikbaar via: <https://www.wellcertified.com/>
3. RESET, 2018. RESET Healthy Buildings Standard (online version only). Online beschikbaar via: <https://www.reset.build/>
4. NCEUB, 2018. Proceedings 2018 Windsor conference. Network for Comfort and Energy Use in Buildings, London, UK. Proceedings. Beschikbaar via: <http://windsorconference.com/>
5. L. Cheng (2017). Indoor air quality monitoring 2.0; seeing the invisible. REHVA Journal, 54, 32-37 (2017). Online beschikbaar via: https://www.rehva.eu/fileadmin/REHVA_Journal/REHVA_Journal_2017/RJ3/p.32/32-37_RJ1703_WEB.pdf
6. WHO, 2010. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. World Health Organisation, Copenhagen, Denmark. Document beschikbaar via: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf
7. EC, 2017. European Commission, Brussels, Belgium. European air quality standards. Online beschikbaar via: <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>
8. <https://www.rivm.nl/fijn-stof/ultrafijn-stof/meten-van-ultrafijn-stof>