

Een model voor het begrijpen van het binnenmilieu, haar bewoners, en interacties op mens en binnenmilieuniveau

Uit onderzoek blijkt dat verblijven in gebouwen niet goed is voor ons welzijn. Zelfs als aan de richtlijnen wordt voldaan en binnenmilieucondities 'comfortabel' genoeg lijken. Het kan eraan liggen dat de richtlijnen gebaseerd zijn op enkelvoudige dosis-respons relaties voor het voorkomen van negatieve effecten, en dat de criteria bepaald zijn voor een gemiddeld (standaard) volwassen persoon. Er wordt voorbijgegaan aan het feit dat we met individuen te maken hebben in verschillende scenario's (e.g. woning, kantoor, school) en situaties (e.g. achter een bureau zitten schrijven, luisteren naar de leraar, koken, slapen). Andere stressoren (fysisch, fysiologisch, persoonlijk, psychologisch en sociaal) en hun geïntegreerde effect in de tijd, evenals mogelijke interacties tussen stressoren op binnenmilieuniveau, en interacties tussen lichamelijke reacties op mensniveau, worden niet meegenomen. In de afgelopen jaren is duidelijk geworden dat er behoefte is aan een ander model. Een model dat wel in staat is om symptomen en klachten in specifieke situaties te verklaren en wellicht zelfs een negatief effect naar een positieve ervaring kan keren.

Philomena M. Bluysen

INLEIDING

De meeste mensen zijn zich ervan bewust dat het buitenmilieu belangrijk is, in relatie tot klimaatverandering maar ook direct gerelateerd aan onze gezondheid. De effecten van de binnenmilieukwaliteit zijn daarentegen geen algemeen gedachtegoed. We weten dat luchtvervuiling zoals fijnstof en lawaai veroorzaakt door vliegtuigen, net als teveel zonlicht zeer ongezond kan zijn. We realiseren ons echter niet dat mensen in de westerse landen circa 80-90% van hun tijd binnen doorbrengen, waarvan meer dan 60% van hun tijd thuis (Bonney et al. 2004) en de rest van de tijd op werk, op school of onderweg. Blootstelling 'binnen' is dus veel langer dan buiten. Er zijn nogal wat ziekten en aandoeningen gerelateerd aan het binnen verblijven, zoals mentale ziekten, zwaarlijvigheid en ziekten die langer nodig hebben om zich te manifesteren, waaronder hart- en vaatziekten, chronische aandoeningen van de ademhalingswegen (denk aan astma bij kinderen en COPD bij volwassenen) en kanker (Bonney et al. 2004; Fisk et al. 2007; Lewtas 2007; Houtman et al. 2008), en meer recent COVID-19 (Marowska et al. 2020).

Wereldwijd laten studies zien dat relaties tussen binnenmilieucondities (thermische aspecten, ventilatie, verlichting, vocht, schimmels en lawaai) en welzijn (gezondheid en comfort) van bewoners van kantoorgebouwen, scholen en woningen, complex zijn en daardoor moeilijk te ontcijferen (e.g. Bonney et al. 2004; Kim and de Dear 2012; Bluysen 2017). Er zijn vele binnenmilieu-stressoren die effecten additief veroorzaken of via complexe interacties: thermische aspecten (e.g. tocht, temperatuur), visuele aspecten (e.g. reflectie, uitzicht, helderheidsverschillen), luchtkwaliteit (e.g. geuren, vocht, schimmel, radioactieve straling, chemische stoffen, deeltjes) en akoestische aspecten (e.g. lawaai en trillingen) (ASHRAE 2010; Torresin et al. 2018). Studies tonen aan dat binnenmilieucondities geassocieerd kunnen worden met dis-comfort (ergernis), gebouw-gerelateerde symptomen (e.g. hoofdpijn, neus-, oog- en huidsymptomen, en moeheid), gebouw-gerelateerde ziekten (e.g. legionnaires ziekte), afname in leerprestatie en productiviteitsvermindering (Bluysen 2014a).

Op basis van de wetenschappelijke uitkomsten lijkt het verblijven in gebouwen niet goed voor onze gezondheid te zijn. Zelfs als de condities comfortabel genoeg lijken en voldoen aan de huidige richtlijnen voor binnenmilieukwaliteit (thermische, licht, akoestische en luchtkwaliteit), voelen mensen zich oncomfortabel of worden ziek. Die richtlijnen zijn gebaseerd op enkelvoudige dosis-respons relaties (het effect van één parameter zoals de lichtsterkte op een werkblad of de luchttemperatuur in een ruimte) en houden geen rekening met interactie-effecten op mens of binnenmilieu niveau (Bluyssen 2014b). Daarnaast zijn die richtlijnen vooral gericht op het voorkomen van negatieve effecten, en niet op het creëren van positieve ervaringen.

In dit artikel wordt eerst uitgelegd wat binnenmilieu is en hoe we door 'slechte' kwaliteit van het binnenmilieu ziek kunnen worden. Vervolgens wordt ingegaan op de indicatoren die er zijn om de binnenmilieukwaliteit te bepalen, en waarom er behoefte is aan een 'nieuw' model die verder gaat dan enkelvoudige dosis-respons relaties. Tot slot wordt een 'nieuw' model gepresenteerd en gevalideerd aan de hand van verschillende studies.

WAT IS BINNENMILIEUKWALITEIT?

Binnenmilieukwaliteit wordt bepaald door de kwaliteit van vier factoren: luchtkwaliteit, visuele of lichtkwaliteit, akoestische of geluidkwaliteit en thermische kwaliteit.

Thermische kwaliteit

Thermische kwaliteit of thermisch comfort is de parameter waarmee we waarschijnlijk het meest bekend zijn. Het weer is een dagelijks onderwerp van gesprek en gaat precies over die aspecten die met thermisch comfort te maken hebben, zoals te warm, te koud of tocht. De grote naam die iedereen in het vakgebied met thermisch comfort associeert is professor Fanger. Zijn thermo-fysiologisch model vormt nog steeds de basis voor de richtlijnen die wij hebben voor thermisch comfort. In Nederland bestaan die uit richtlijnen voor de operationele temperatuur (het gemiddelde van de

lucht- en de stralingstemperatuur), luchtsnelheid, tochtrisico (berekend met luchtsnelheid, luchttemperatuur en turbulentie), verticale temperatuurgradiënt en stralingsasymmetrie (NEN, 2019).

Thermische stress treedt op als mensen ontevreden zijn over een bepaalde thermische situatie, bijvoorbeeld als ze niet in staat zijn om hun thermische evenwicht te behouden of als ze geloven of denken dat dit niet mogelijk is. Verwachtingen en de mate van (ervaren) controle lijken hierbij belangrijk. Het zogeheten adaptieve model, gebaseerd op praktijkstudies van mensen in het dagelijkse leven, waarin de context en voorkeuren van de bewoner wel worden onderkend, worden daarom steeds meer toegepast (de Dear and Brager, 2002).

Zowel Fanger's model als het adaptieve model zijn gericht op het creëren van thermische neutrale condities. Recent is ontdekt dat blootstelling aan neutrale thermische condities niet noodzakelijkerwijs gezond hoeft te zijn. Studies tonen aan dat blootstelling aan neutrale thermische condities gedurende langere tijd, tot een toename in vetweefsel kan leiden. Dit is eerst aangetoond bij ratten en later bij volwassen mannen (Marken Lichtenbelt et al. 2009). Dit betekent feitelijk dat als je lichaam niet hoeft te werken om thermisch comfortabel te zijn, er meer vet wordt opgeslagen!

Lichtkwaliteit

De factor visuele of lichtkwaliteit omvat aspecten zoals lichtsterkte, helderheid en kleur. Maar ook aspecten die je graag zou willen vermijden, zoals reflectie op een vloer of werktafel. Visueel comfort is echter meer dan het voorzien in voldoende licht om een taak goed uit te kunnen voeren. Uitzicht is ook een belangrijk aspect om mee te nemen. De lichtkwaliteit van een ruimte wordt bepaald door het samenspel van: de bronnen van licht (binnen en buiten), de verdeling van licht in de ruimte en de manier waarop het licht wordt ontvangen. Huidige richtlijnen voor lichtkwaliteit zijn gericht op het voorzien in voldoende licht om een taak goed uit te voeren, zoals de horizontale verlichtingssterkte op het werkblad, kleurweergave van

kunstlicht, en daglichtfactorindex, maar ook het beperken van verblindingshinder zowel van daglicht als kunstlicht (NEN, 2019).

Licht nemen we waar met de lichtgevoelige cellen in de binnenste laag van ons oog (retina): de staafjes en de kegeltjes, waarvan de kegeltjes (drie soorten) gevoelig zijn voor kleuren oftewel de verschillende golflengten van licht. Recent is een derde type lichtreceptor ontdekt. Dit derde type lichtgevoelige cel ligt verspreid tussen de staafjes en kegeltjes, en spelen een rol bij het besturen van de grootte van de pupilopening en van de biologische klok (via de productie van melatonine). Onder invloed van licht, geeft de hypothalamus een boodschap door aan de pijnappelklier om melatonine te produceren, een hormoon die zorgt dat wij willen slapen. Indien wij gedurende de nacht worden blootgesteld aan licht, dan wordt de productie van melatonine onmiddellijk stopgezet, alertheid en kerntemperatuur van het lichaam neemt toe en de slaap wordt verstoord (Hinson, Raven & Chew 2010). Nog niet zo lang geleden heeft de gezondheidsraad bevestigd dat nachtwerken het risico op hart- en vaatziekten en diabetes type 2 vergroot (Gezondheidsraad 2017). Dit geeft aan dat ook non-visuele aspecten van licht belangrijk zijn om mee te nemen.

Geluidskwaliteit

De akoestiek of geluidskwaliteit van een ruimte wordt bepaald door de bronnen van geluid, binnen (bijvoorbeeld ruziënde burens en installaties) en buiten (verkeer), de verdeling van het geluid in de ruimte, en de manier waarop het geluid wordt ontvangen en geïnterpreteerd. Een geluid komt de gehoorgang binnen, brengt het trommelvlies en de gehoorbeentjes in beweging. Vervolgens worden die trillingen overgebracht naar de vloeistof in het binnenoor, waar zenuwuiteinden deze via de achtste craniale zenuw doorsturen naar de hersenen. Het evenwichtsorgaan, dat onafhankelijk van ons gehoor opereert, zit ook in het binnenoor. Terwijl het evenwichtsorgaan gevoelig is voor lage frequenties (trillingen), is het gehoor gevoeliger voor hoge frequenties.

Blootstelling aan hard geluid of lawaai wordt geassocieerd met directe geluidseffecten, zoals tijdelijk of zelfs permanent gehoorverlies. Echter, geluidseffecten treden niet alleen op bij hoge geluidsniveaus, maar ook bij relatief lage omgevingsgeluiden zoals bij slapen of geconcentreerd werken (Babisch 2008). Ergernis speelt een belangrijke rol bij het mechanisme dat hierbij in werking wordt gebracht. Als we wat beter naar dit zogeheten anti-stress mechanisme kijken, dan zien we dat in reactie op verschillende stressoren, de afscheiding van anti-stress hormonen kan toenemen. Op korte termijn wordt adrenaline geproduceerd en wordt het lichaam voorbereid voor actie met de productie van noradrenaline. Indien de stressor van korte duur is, wordt redelijk snel de balans hersteld. Echter, bij langdurige prikkeling (chronische stress), neemt de productie van anti-stresshormonen zoals cortisol toe, en kan een chronische onbalans van de afgescheiden stresshormonen optreden. Het is aangetoond dat o.a. cortisol een belangrijke rol speelt bij de totstandkoming van de gezondheidseffecten van deze chronische onbalans. Hoge cortisolniveaus dragen bij aan veranderingen in koolhydraat- en vetverbranding, en kan tot angst, depressie en hartziekten leiden. Terwijl een lage cortisolwaarde vermoeidheid, allergieën, astma en toename in gewicht tot gevolg kunnen hebben.

Huidige richtlijnen voor geluid bestaan voornamelijk uit maximaal toelaatbare geluidsniveaus (NEN, 2019). Daarnaast wordt nagalmtijd en spraakverstaanbaarheid toegepast (Bluyssen, 2009)

Luchtkwaliteit

Luchtkwaliteit wordt bepaald door de verontreiniging(en) waar mensen aan worden blootgesteld (Bluyssen 2015). De verontreinigingen die we in het binnenmilieu kunnen aantreffen bestaan uit gasen, waarvan je sommige kan ruiken (zoals bijvoorbeeld de afgifte van stoffen door schimmels in een badkamer) en andere niet (zoals bijvoorbeeld koolmonoxide, een gas dat wordt geproduceerd bij verbranding). En dan zijn er nog verschillende andere verontreinigingen in de binnenlucht die de luchtkwaliteit beïnvloeden zoals water/vocht

en deeltjes. Deze deeltjes kunnen van biologische afkomst zijn, zoals huisstofmijt en legionella, maar deeltjes kunnen ook door materialen worden afgegeven. Een voorbeeld hiervan is asbest, of eigenlijk asbestvezels.

Luchtkwaliteit wordt bepaald door de bronnen, de verdeling in de ruimte en de ontvanger. Via de receptoren in het bovenste deel van de neus (het olfactorisch epitheel), eentje voor reuk en eentje voor irritatie (het trigeminale of chemische zintuig), kunnen we luchtkwaliteit waarnemen. Het chemisch zintuig zit overigens niet alleen in het olfactorisch epitheel, maar komt in de gehele neus- en mondholte voor. Wanneer de uiteinden van de reuk en chemische zintuigen worden gestimuleerd door verontreinigingen, sturen deze signalen naar de hersenen waar deze signalen worden geïntegreerd en geïnterpreteerd. Het resultaat van dit proces heet waargenomen luchtkwaliteit. Terwijl sommige mensen niets ruiken, die heten anosmisch, kunnen anderen bepaalde stoffen op deeltjes per triljoen (ppt) niveau waarnemen.

Wanneer je inademt, komt de lucht via je mond of neus, keel en strottenhoofd in je luchtpijp terecht. Grote deeltjes zijn dan reeds verwijderd. Echter, de kleine deeltjes bewegen met de lucht mee naar de twee longen via de twee bronchiale pijpen, ook wel primaire bronchiën genoemd. In de longen, vertakken deze primaire bronchiën in bronchiën die eindigen in longblaasjes. In deze longblaasjes vindt uitwisseling van zuurstof met kooldioxide plaats. Zuurstof passeert het membraan van de longblaasjes en de bloedvaten zodat het in de bloedbaan kan komen. Tegelijkertijd wordt kooldioxide uit het bloed naar de longen getransporteerd, waar deze wordt uitgeademd. We hebben ongeveer 30 miljoen longblaasjes met een totale oppervlakte van ongeveer 85 m², beschikbaar voor gasuitwisseling met bloed. Echter, de ultra-fijne of nanodeeltjes kunnen ook dit membraan passeren en dus ook in de bloedbaan komen en daarmee de organen bereiken, waar ze zogeheten oxidatieve stress kunnen veroorzaken. Oxidatieve stress treedt op als er meer vrije radicalen aanwezig zijn dan antioxidanten. Oxidatieve stress kan cellen

beschadigen en systemische ontstekingen tot gevolg hebben, en zelfs tot celdood leiden.

NB. Oxidatieve stress is ook verantwoordelijk voor het verbranden van je huid door de zon en het scheuren van je trommelvlies door hard geluid.

Luchtverontreiniging is waarschijnlijk de meest belangrijke oorzaak van oxidatieve stress in het binnenmilieu. Maar luchtverontreiniging is voor meer mechanismen verantwoordelijk. Zoals geur en irritatie van de mond- en neusholte door organische vluchtige stoffen, radon (een vorm van straling), asbest, een vezel die longkanker tot gevolg kan hebben, en verschillende weekmakers afkomstig van bepaalde kunststofmaterialen. Deze laatste stoffen worden ook wel hormoononderbrekers genoemd, omdat zij effect kunnen hebben op de hormoonproductie en -balans.

Richtlijnen voor luchtkwaliteit bestaan uit:

- a) minimale ventilatiehoeveelheden in l/s/persoon of l/s/m² vloeroppervlakte, om de emissies van personen en van bouw- en inrichtingsmaterialen te verdunnen/ventileren;
- b) een limietwaarde voor de CO₂ concentratie op de buitenluchtconcentratie als indicator voor emissies van personen, toegepast om de benodigde hoeveelheid verse (buiten)lucht te bepalen;
- c) limietwaarden voor maximale blootstelling aan verontreinigingen in de binnenlucht, zoals formaldehyde, koolmonoxide en radon (NEN, 2019).

Interacties

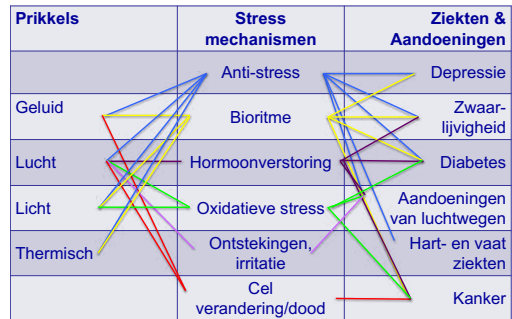
Uit bovenstaand overzicht blijkt dat in ons lichaam verschillende stressmechanismen aanwezig zijn die als gevolg van externe stressoren zoals lawaai, luchtverontreiniging, slechte verlichting en thermische onbehaaglijkheid optreden: het anti-stressmechanisme, het mechanisme dat het bioritme regelt, hormoonverstoring, oxidatieve stress, ontstekingen, celveranderingen, en celdood. Ziekten en aandoeningen treden op wanneer die mechanismen de stressoren niet meer aankunnen of wanneer ze doorslaan in het reageren erop. De relaties tussen de stressoren, de mechanismen

in ons lichaam, en de effecten die optreden (de ziekten en aandoeningen) zijn dus complex. Elk van deze mechanismen heeft wel een relatie met één of meerdere ziekten en aandoeningen (zie Figuur 1). Dit verklaart deels waarom het in de praktijk zo moeilijk is om één oorzaak te vinden voor symptomen of klachten van bewoners.

Via al deze mechanismen treden er dus interacties op in ons lichaam. Maar er treden ook interacties op in de omgeving, zoals bijvoorbeeld chemische reacties op luchtverontreinigingen, interacties van microbiologische groei op oppervlakken, en interacties tussen verschillende binnenmilieufactoren (ASHRAE 2010; Bluysen, 2014b; Torresin et al. 2018) zoals:

- Licht en thermisch comfort, wanneer zonnestralen het binnenmilieu opwarmen.
- Thermische condities en binnenlucht, de emissie van de meeste vluchtige organische stoffen door materialen neemt toe bij een stijgende temperatuur.
- Akoestiek en binnenlucht, via de ventilatielucht van een klimaatinstallatie kan geluid van stromende lucht en geluid van de ventilator in de ruimte komen, evenals via ventilatie via open ramen, wanneer geluid van buiten naar binnen komt.

FIGUUR 1 ► MOGELIJKE ASSOCIATIES TUSSEN STRESSOREN, MECHANISMEN, ZIEKTEN EN AANDOENINGEN



Bron: Figuur 1.3 in Bluysen 2014a

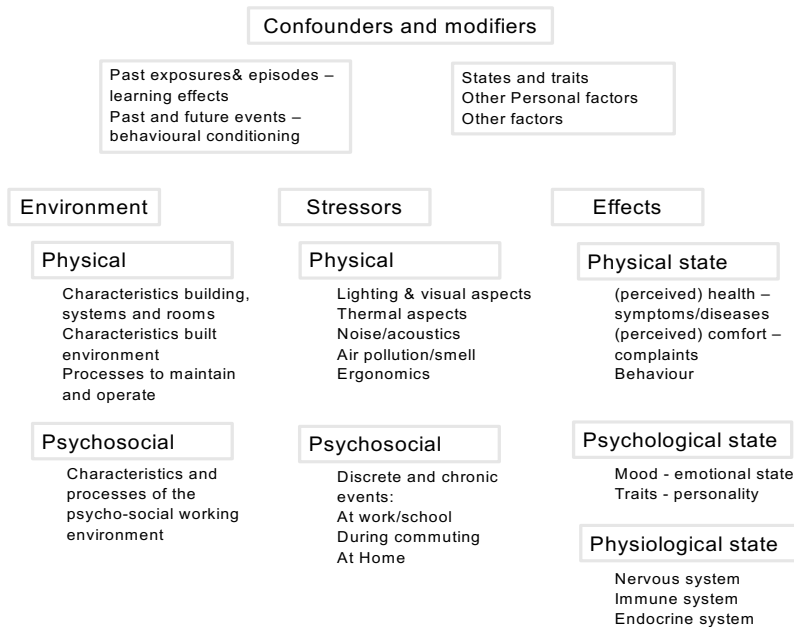
Wanneer bepaalde acties worden ondernomen om een factor van het binnenmilieu te verbeteren, kunnen er mogelijke nadelige effecten optreden voor een andere factor (Tabel 1).

Verder weten we dat de effecten worden beïnvloed door psychologische, fysiologische, persoonlijke, sociale - en omgevingsfactoren en stressoren (Figuur 2). Wij worden blootgesteld aan een mix van stressoren, die in de tijd veranderen en onze reacties (de coping en de effecten) worden beïnvloed door erfelijke factoren, eerdere blootstellingen en interacties die tussen stressoren optreden (e.g. Bluysen, 2014b).

TABEL 1 ► ACTIES EN MOGELIJKE INTERACTIES IN HET BINNENMILIEU

Factor	Actie	Factor	Interactie-effect
Thermische kwaliteit	Verhogen temperatuur Gebruik van zonneschermen tegen oververhitting	Binnenlucht Verlichting	Toename in emissies Vermindering daglichttoetreding
Visuele kwaliteit	Gebruik van glazen tussenwanden Toename van glasoppervlak in de gevel	Akoestiek Thermisch	Mogelijke reflecties van geluid Mogelijk oververhitting
Akoestiek	Geluidsadsorptiemateriaal in toevoerkanalen Ramen dicht	Binnenlucht Binnenlucht	Mogelijke afname luchtkwaliteit Minder ventilatie via ramen
Binnenlucht kwaliteit	Meer ventileren Openen ramen Hogere relatieve vochtigheid Verwijderen gordijnen, tapijt	Thermisch Akoestiek Thermisch Akoestiek	Mogelijk tocht Mogelijk lawaai van buiten Beïnvloeding groei schimmels Afname geluidsabsorptie

FIGUUR 2 ► STRESSOREN, FACTOREN, OORZAKEN EN EFFECTEN



Aangepast van Bluysen 2014a

HET BEPALEN VAN DE KWALITEIT VAN HET BINNENMILIEU

Indicatoren voor binnenmilieukwaliteit

De gezondheids- en comfort-indicatoren waarmee we vandaag de dag bekend zijn, kunnen worden verdeeld in drie groepen van indicatoren (Bluysen 2010; 2014b):

- De indicatoren gericht op de bewoner of eindgebruiker, zoals ziekteverzuim, productiviteit, aantal symptomen of klachten, en specifieke gebouw-gerelateerde ziekten;
- De indicatoren die gebruik maken van de dosis of binnenmilieuparameter, zoals concentraties van bepaalde verontreinigingen, temperatuur en lichtintensiteit; en
- De indicatoren die zich met het gebouw en haar onderdelen bezighouden: bepaalde karakteristieken van een gebouw en haar onderdelen, zoals de mogelijkheid van schimmelgroei, en zelfs certificering van een gebouw en haar onderdelen.

Van deze groepen van indicatoren, wordt de tweede (de dosis-gerelateerde indicatoren) het meest toegepast in richtlijnen. Echter, de achterliggende dosis-respons mechanismen zijn niet altijd eenduidig. Neem bijvoorbeeld de minimale ventilatiehoeveelheid. Sinds bijna 200 jaar, zijn minimale ventilatiehoeveelheden, gebaseerd op CO₂ als een indicator voor bio-effluënten, of op bepaalde emissies van materialen, het onderwerp van discussie. Wij weten nog steeds niet wat we moeten aanhouden. De huidige richtlijnen, zoals maximale concentraties voor bepaalde verontreinigingen, ventilatiehoeveelheid, en temperatuur ranges, zijn dan ook vooral gebaseerd op enkelvoudige dosis-respons relaties. Binnenmilieukwaliteit wordt eigenlijk middels effect modellering bepaald: van elke parameter of indicator wordt apart bekeken wat het effect kan zijn. Met uitzondering van gezondheidsbedreigende prikkels waarvoor een duidelijk relatie is bepaald, maken de complexiteit en het aantal binnenmilieu parameters evenals een

gebrek aan kennis, een prestatiegerichte bepaling met alleen limiet-waarden voor enkelvoudige parameters moeilijk en soms zelfs zonder enige betekenis.

Behoeft aan nieuw model

Het is daarom tijd voor een ander model, een andere manier om binnenmilieukwaliteit te bepalen. Een aanpak waarin voor verschillende scenario's mogelijke problemen, interacties, mensen en effecten, allemaal worden meegenomen (Bluyssen 2014a). Gericht op situaties in plaats van slechts op enkelvoudige dosis-respons relaties. Een aanpak waarbij niet alleen de kwantitatieve dosis-gerelateerde indicatoren, uitgedrukt in getallen en/of ranges van getallen voor elk van de factoren (lucht, verlichting, akoestiek en thermische aspecten) worden gebruikt, maar alle stressoren en factoren, of die nu van psychologische, fysiologische, fysische, chemische, persoonlijke, of sociale aard zijn. Of die een positief of negatief effect kunnen hebben.

Dit betekent dat behalve een andere benadering van binnenmilieukwaliteit, het ook belangrijk is om andere indicatoren mee te nemen. Indicatoren die gerelateerd kunnen worden aan gezondheid en comfort van bewoners zodat het mogelijk wordt om een negatief effect om te zetten in een positieve ervaring. Het is duidelijk dat methoden gericht op het beheersen van de enkelvoudige binnenmilieufactoren met de zogeheten dosis of binnenmilieu-gerelateerde indicatoren niet voldoende zijn. Er zijn twee andere categorieën van indicatoren die we kunnen gebruiken. In de groep gebouw-gerelateerde indicatoren kunnen bepaalde maatregelen of kenmerken van een gebouw worden gebruikt. In de groep bewoner-gerelateerde indicatoren zal de nadruk moeten liggen op indicatoren die ons iets vertellen over de effecten van stress: indicatoren die informatie geven over veranderingen in het lichaam en de ervaringen van mensen (Bluyssen 2014b).

Dit vereist een 'nieuw' model voor het bepalen van binnenmilieukwaliteit (Figuur 3) (Bluyssen, 2019a). Een model die gecombineerde effecten van stress-

factoren in gebouwen (patronen) meeneemt, evenals de individuele voorkeuren en wensen van de bewoners (profielen) voor verschillende scenario's (bijv. woningen, kantoren, scholen) en verschillende situaties (bijv. slapen/eten, vergaderen/geconcentreerd werken, les krijgen); en interacties die plaatsvinden op zowel mens- als binnenmilieuniveau. Een model dat kan worden gebruikt om te bepalen wat er nodig is voor het (her)ontwerpen van gezonde en comfortabele gebouwen, zodat dat negatieve effecten worden voorkomen en positieve ervaringen worden gestimuleerd.

VALIDATIEMODEL

Verschillende veldstudies zijn uitgevoerd om het nieuwe model (Figuur 3) te vullen en te valideren, en dus voor verschillende scenario's profielen en patronen te kunnen bepalen. Hierbij werd gebruik gemaakt van een checklist (voor het verzamelen van gebouw-gerelateerde indicatoren) en een vragenlijst (voor het verzamelen van bewoner-gerelateerde indicatoren) om:

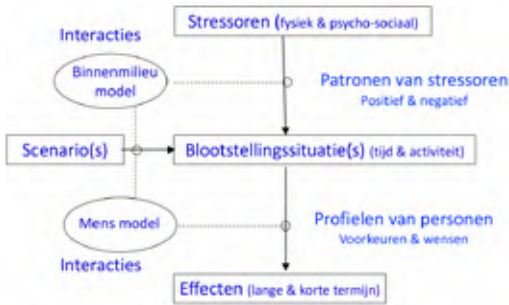
- Patronen van gebouw-gerelateerde positieve en negatieve stressoren te relateren aan bewoner-gerelateerde indicatoren (gezondheid: symptomen; comfort: klachten), en
- Clusters van bewoners met bijbehorende profielen te kunnen bepalen.

Patronen van stressoren

Voor het bepalen van patronen van stressoren werd multivariaat analyse toegepast op gegevens van 7441 kantoormedewerkers en 167 kantoorgebouwen (Bluyssen et al. 2015), 396 studenten en hun woningen (Bluyssen et al. 2016), 949 lagere schoolkinderen en 45 klaslokalen (Bluyssen et al. 2018; Bluyssen 2019b) en op gegevens van 556 medewerkers en poliklinieken in zes Nederlandse ziekenhuizen (Eijkelenboom, Ortiz, Bluyssen, 2021a).

Casus 1: Voor de 396 studenten en hun woningen werden zelf-gerapporteerde eigenschappen van de studenten en hun woningen gelinkt met zelf-gerapporteerde rinitis (irritatie van bovenste luchtwegen). De resultaten lieten zien dat biologische verontreinigingen (veroorzaakt door huisdieren), chemische verontreinigingen (veroorzaakt

FIGUUR 3 ► NIEUW ONDERZOEKMODEL



Bluyssen, 2019a

door MDF in de slaapkamer), ventilatie (openen van raam in slaapkamer) en fysieke activiteit (training), geassocieerd werden met rinitis bij de studenten. Behalve erfelijkheid, laat deze uitkomst zien dat rinitis een meervoudige oorzakelijke ziekte is; bij jongvolwassenen waren zowel persoonlijke als omgevingsfactoren gerelateerd aan deze ziekte. Dit onderzoek liet zien hoe belangrijk het is om alle mogelijke stressoren mee te nemen wanneer de oorzaak van een bepaalde ziekte of aandoening wordt bestudeerd.

Casus 2: Voor 556 medewerkers van poliklinieken in zes Nederlandse ziekenhuizen (Eijkelenboom, Ortiz, Bluyssen, 2021a), werden door onderzoekers in kaart gebrachte kenmerken van de gebouwde omgeving, de installaties en 127 ruimtes van de ziekenhuizen gelinkt met zelf-gerapporteerde droge ogen en hoofdpijnklachten. De multivariaat regressiemodellen, beiden gecorrigeerd voor persoonlijke en werk-gerelateerde aspecten, lieten zien dat zowel het hebben van droge ogen als hoofdpijn, gerelateerd waren met gebouw-gerelateerde aspecten die lucht- en lichtkwaliteit beïnvloeden. Deze uitkomst bevestigde eerdere bevindingen in kantoorstudies (o.a. Kluzenaar et al. 2016).

Profielen van clusters

Voor het bepalen van clusters en bijbehorende profielen, werd een 2-staps cluster analyse toegepast op zelf-gerapporteerde gezondheid, comfort, voorkeuren en wensen van 949 lagere schoolkinderen in 45 klaslokalen (Zhang et al. 2019;

Bluyssen 2019b); zelf-gerapporteerde gezondheid en comfort van 1014 kantoormedewerkers in 20 kantoorgebouwen in Nederland (Kim & Bluyssen, 2020); en zelf-gerapporteerde gezondheid, comfort, voorkeuren en wensen van 556 medewerkers van poliklinieken in zes Nederlandse ziekenhuizen (Eijkelenboom & Bluyssen 2020).

Casus 1: In de scholenstudie zijn de kinderen, op basis van een index voor binnenmilieufactoren die zij belangrijk vonden (geluiden binnen/buiten; verstaan leraar, licht op bord/op tafel, frisse lucht, geuren, temperatuur stoel/voeten/lucht) en hun voorkeuren voor individueel regelbare devices (koptelefoon, ventilator, tafellamp, verwarmde tafel/rugleuning/stoel) om het binnenmilieu te verbeteren, met behulp van de 2-staps cluster analyse in zes clusters verdeeld (Tabel 2). Vier van de zes clusters waren gericht op specifieke binnenmilieufactoren: de "Geluid", de "Geur en Geluid", de "Thermische en tocht", en de "Verlichting" cluster. De andere twee clusters waren niet gericht op een specifieke binnenmilieufactoor: de kinderen in de "Alles" cluster vonden alle binnenmilieufactoren in de klas belangrijk en hadden ook van alles last, terwijl de kinderen in de "Niets" cluster geen enkele factor belangrijk vonden en hadden ook nauwelijks ergens last van.

Casus 2: In de kantorenstudie van 1014 kantoormedewerkers in 20 kantoorgebouwen in Nederland (Kim & Bluyssen, 2020), liet de 2-stapsclusteranalyse drie clusters zien: 1) gezonde en tevreden medewerkers; 2) redelijk gezonde medewerkers, met vooral last van lawaai; 3) ongezonde medewerkers die klaagden over met name luchtkwaliteit en de temperatuur. Terwijl de eerste groep verreweg het gezondst was, had de ongezonde groep medewerkers hogere statistisch significante risico's voor het hebben van gebouw-gerelateerde symptomen zoals droge ogen en tranende, jeukende ogen.

Interacties op binnenmilieuniveau

In de scholen studie, zijn ook interacties met het binnenmilieu in de tijd bestudeerd (Zhang & Bluyssen 2019b; Bluyssen 2019). De leraren werden gevraagd hoe vaak zij per dag acties (zoals het ope-

TABEL 2 ► PROFIELEIGENSCHAPPEN VAN DE ZES CLUSTERS

Cluster	Meest last van	Belangrijk
Geluid	Lawaai	Lawaaioverlast binnen en buiten
Alles	Alles	Alles
Geur en geluid	Lawaai en geur	Verstaan leraar en frisse lucht
Thermisch en tocht	Tocht en temperatuur	Tocht en temperatuur
Verlichting	Kunst- en zonlicht	Verlichting op tafel en (smart)board
Niets	Nauwelijks iets	Niets

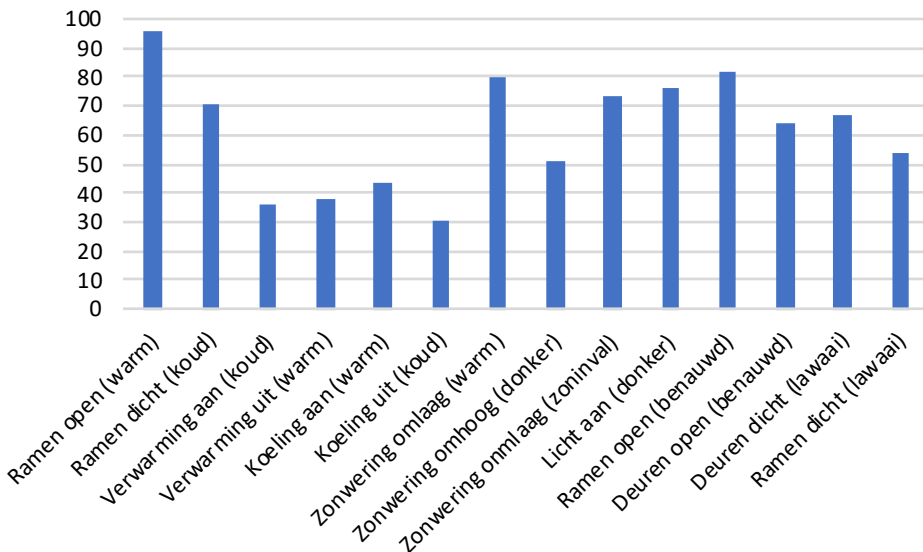
nen/dichtdoen van ramen en/of deuren; het licht aan/uit doen/ zonwering omhoog/omlaag; verwarming aan/uit) uitvoerden om het binnenmilieu te verbeteren (Figuur 4). Uit de vergelijking met de klachten van de kinderen en het aantal keren dat de leraar een actie uitvoerde, bleek dat die acties nauwelijks een effect hadden op hoe de kinderen zich voelden. Dit kan te maken hebben met het feit dat niet ieder kind dezelfde wensen/behoefte heeft, zodat het voor een leraar onmogelijk is om ieder kind tevreden te stellen. Daarnaast kan een bepaalde actie de binnenmilieucondities voor het ene kind verbeteren, maar voor het andere kind juist verslechteren.

Interacties op mensniveau

Naast interacties op binnenmilieuniveau is ook gekeken naar interacties op mensniveau. In een studie met 250 kinderen van zeven lagere scholen (Bluyssen et. al. 2019; Bluyssen 2020) werden de kinderen in groepen van maximaal 16 blootgesteld aan twee van de 36 verschillende geteste binnenmilieu configuraties op acht verschillende dagen in de Experience room van het SenseLab (Bluyssen et al. 2018b):

- *‘Alle’ versus ‘minder’ akoestische panelen:* creëert een ander interieur, een verschillend uitzicht naar buiten en een andere akoestische kwaliteit (nagalmtijd van 0,22 versus 0,7).

FIGUUR 4 ► PERCENTAGE VAN LERAREN VAN DE TRADITIONELE SCHOLEN DIE TENMINSTE EEN KEER PER DAG ACTIES UITVOEREN



Note: De redenen voor de acties zijn tussen haakjes weergegeven

- *Twee ventilatie principes:* meng- en verdringings-ventilatie. De ventilatiehoeveelheid was 600 m³/uur (30-40 m³/uur per persoon), en de temperatuur was ingesteld op 21 graden Celsius.
- *Drie soorten (en patronen) van ledverlichting:* direct, indirect en softverlichting (setting 100%). Softverlichting (setting 40% van het maximaal mogelijk) werd tijdens de introductie en de workshop als de basissetting gebruikt.
- *Drie soorten achtergrondgeluid:* geen geluid, verkeerslawaaï en pratende kinderen, beiden met 60 dB(A) ('lawaaï' achtergrondniveau: 45 dB(A) wordt als normaal beschouwd).

Tijdens elke configuratie werden de kinderen gevraagd naar hun tevredenheid met licht, geluid, geur, temperatuur en tocht. De uitkomst van dit onderzoek naar gecombineerde effecten van verschillende binnenmilieufactoren liet zien dat de condities met 'alle' akoestische panelen een positief effect had op de beoordeling van geluid. Ook werd een duidelijk negatief effect van 'minder' akoestische panelen op de beoordeling van geur, tocht en licht gezien. Geur werd in het algemeen het slechts beoordeeld bij 'pratende kinderen', 'mengventilatie' en 'direct licht', terwijl in de Experience room geen geur was toegevoegd. Achtergrondgeluid, met name 'pratende kinderen', had invloed op de beoordeling van zowel geluid als geur, hetgeen kan betekenen dat er misschien eerder conditionering heeft plaatsgevonden bij het horen van pratende kinderen.

De bevinding dat interactie-effecten van verschillende binnenmilieu-stressoren (geur, visueel en gehoor) waarschijnlijk in het centrale zenuwstelsel plaatsvond, geeft niet alleen de noodzaak aan van een geïntegreerde aanpak, maar bevestigt dat interactie-effecten van verschillende binnenmilieu-stressoren op mensniveau plaatsvinden.

Situatie - context

Tot slot, is er gekeken naar verschillen tussen verschillende situaties of context voor eenzelfde scenario.

Casus 1: In de scholenstudie werden verschillen gezien tussen gezondheid en comfort van kinderen op traditionele en niet-traditionele scholen (Bluyssen, 2019b). Op 17 scholen (45 klaslokalen) van de 21 scholen (54 klaslokalen) die meededen, werd er lesgegeven volgens een traditioneel onderwijssysteem (traditionele scholen). De overige vier scholen (negen klaslokalen) volgden een niet-traditioneel onderwijssysteem (volgens de filosofie of theorie van Jena, Montessori of Dalton). Kinderen van niet-traditionele scholen hadden gemiddeld gezien minder symptomen en klachten dan kinderen van traditionele scholen. Deze verschillen kunnen naast de achtergrond van kinderen, te maken hebben gehad met verschil in context: het verschil in de manier waarop werd lesgegeven, de tijd die de kinderen doorbrachten in een bepaald klaslokaal, en/of de organisatie van groepen en kinderen.

Casus 2: Ook is er onderzoek verricht naar voorkeuren en wensen van de staf van poliklinieken in ziekenhuizen, voor en tijdens de pandemie (Eijkelenboom, Ortiz, Bluyssen, 2021b). Aan 17 medewerkers die ook mee hadden gedaan aan de studie voor de pandemie (Eijkelenboom & Bluyssen 2020, werd via semigestructureerde interviews en zelf-aangeleverde foto's van hun werkplek, gevraagd naar hun voorkeuren en wensen tijdens de pandemie. De gegevens werden geanalyseerd middels content analyse. Bezorgdheid over binnenluchtkwaliteit en verslechterde interactie met patiënten, waren de grootste verschillen met de beleving voor de pandemie. Uit deze studie werd verder geconcludeerd dat door omstandigheden voorkeuren t.a.v. binnenmilieu kunnen veranderen. Dit betekent ook dat profielen dynamisch kunnen zijn. Daarom is het belangrijk om profielen niet als iets statisch te zien.

SLOTWOORD

Onderzoek laat zien dat, zelfs wanneer de condities aan de richtlijnen voor binnenmilieu lijken te voldoen, verblijf binnen niet goed is voor onze gezondheid. Het begrijpen van het binnenmilieu en haar bewoners is nodig. We zullen moeten accepteren dat we met mensen te maken hebben die

verschillend zijn in voorkeuren en behoeften en dat de binnenmilieukwaliteit meer is dan de som der delen.

Dit vereist een geïntegreerde benadering waarin gecombineerde effecten van positieve en negatieve stressoren in gebouwen op mensen (patronen), interacties op en tussen verschillende niveaus (mens en binnenmilieu), en ook de (dynamische) voorkeuren en behoeften van de bewoners (profielen) in verschillende scenario's, en situaties worden meegenomen.

Deze benadering zal ons helpen om de interacties, de stressoren evenals de individuele behoeften en voorkeuren, afhankelijk van gedrag (activiteiten)

beter te begrijpen; en het mogelijk te maken om profielen van verschillende mensen te matchen met patronen van positieve en negatieve stressoren voor een bepaalde situatie.

Deze aanpak kan ook helpen om persoonlijke binnenmilieus te creëren die zowel de gezondheid als het comfort van het individu verbeteren. Concreet betekent dit dat ontwerpers van gebouwen beter kunnen anticiperen op veranderende voorkeuren en wensen van kantoormedewerkers, studenten, scholieren, etc., doordat we te maken hebben met een aantal clusters, elk met een eigen profiel. Hoe veranderlijk die profielen in de tijd zullen zijn en hoe afhankelijk van de situatie en het scenario; de toekomst zal het leren.

OVER DE AUTEUR

Prof.dr.ir. Philomena M. Bluysen is hoogleraar Indoor Environment, Faculteit Bouwkunde aan de TU Delft. Zij doet al jaren onderzoek naar de kwaliteit van het binnenmilieu van gebouwen.

VOETNOOT

1 Het effect van één parameter zoals de lichtsterkte op een werkblad of de luchttemperatuur in een ruimte.

LITERATUUR

- Aries MBC and Bluysen (2009) Climate Change Consequences for the Indoor Environment, *HERON 54* (1):49-69.
- ASHRAE (2010) *Guideline IOP, Interactions affecting the achievement of acceptable indoor Environments* Second public review, Atlanta, USA.
- Babisch, W. 2008. "Road traffic noise and cardiovascular risk." *Noise and Health* 10:27-33.
- Bonnefoy X, Annesi-Maesona I, Aznar L, Braubachi M, Croxford B, et al. (2004) *Review of evidence on housing and health* Copenhagen, Denmark.
- Bluysen PM (2009) *The Indoor Environment Handbook, How to make buildings healthy and comfortable*, Taylor & Francis, London, UK.
- Bluysen PM (2010) Towards new methods and ways to create healthy and comfortable buildings, *Building and Environment* 45 808-18.
- Bluysen PM (2014b) What do we need to be able to (re) design healthy and comfortable indoor environments? *Intell. Build. Int.* 6(2) 69-92.
- Bluysen PM (2014a) *The Healthy Indoor Environment, How to assess occupants' wellbeing in buildings*, Taylor & Francis, London, UK.
- Bluysen PM (2015) Wat je moet weten over binnenlucht, een eenvoudige gids om jezelf te leren je binnenmilieu te verbeteren, Delft Academic Press, Delft.
- Bluysen PM (2017) Health, comfort and performance of children in classrooms – new directions for research. *Indoor Built Environ.* 26(8) 1040-50.

- Bluysen PM (2019a) Towards an integrated analysis of the indoor environmental factors and its effects on occupants *Intell. Build. Int.* doi.org/1080/17508975.2019.1599318.
- Bluysen, P.M. (2019b) Groot onderzoek naar comfort en gezondheid onder lagere schoolkinderen, *TVVL magazine*, no.4, pp.18-23.
- Bluysen P.M. (2020) Nieuw onderzoeksmodel voor het begrijpen van binnenmilieu basisscholen en effecten op kinderen, *TVVL Magazine* no.2, pp. 45-50.
- Bluysen PM, Roda C, Mandin C, Fossati S, Carrer P, et al. J (2015) Self-reported health and comfort in 'modern' office buildings, *Indoor Air* 26 298-317.
- Bluysen PM, Ortiz M, Roda C (2016) Self-reported rhinitis of students from different universities in the Netherlands and its association with their home environment, *Build. Environ.* 110 36-45.
- Bluysen PM, Zhang D, Kurvers S, Overtoom M, Ortiz M (2018) Self-reported health and comfort of school children in 54 classrooms of 21 Dutch school buildings *Build. Environ.* 138 106-23.
- Bluysen PM, van Zeist F, Kurvers S, Tenpierik M, Pont S, Wolters B, van Hulst L, Meertins D (2018) The creation of SenseLab: A laboratory for testing and experiencing single and combinations of indoor environmental conditions *Intell. Build. Int.* 10(1) 5-18.
- Bluysen PM, Zhang D, Kim DH, Eijkelenboom A, Ortiz M (2019) First SenseLab studies with primary school children: exposure to different environmental configurations in the Experience room, *Intelligent Buildings International*, DOI:10.1080/17508975.2019.1661220.
- De Dear and Brager 2002 De Dear R. and Brager, G. (2002) 'Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE standard 55', *Energy and Buildings* 34 (6).
- Eijkelenboom A. and Bluysen P.M. (2020) Profiling outpatient workers based on their self-reported comfort and preferences of indoor environmental quality and social comfort in six hospitals, *Building and Environment* 184:107220, DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107220.
- Eijkelenboom, A., Ortiz M., Bluysen P.M. (2021a) Building characteristics associated with the prevalence of dry eyes and headaches of outpatient workers in six hospital buildings in the Netherlands, *Indoor and Built Environment*, <https://doi.org/10.1177/1420326X211023125>.
- Eijkelenboom A., Ortiz M.A., Bluysen P.M. (2021b) Preferences for indoor environmental and social comfort of outpatient staff during the COVID-19 pandemic, an explanatory study, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18, 7353. <https://doi.org/10.3390/ijerph18147353>.
- Fisk WJ, Lei-Gomez Q, Mendell MJ (2007) Meta-analysis of the associations of respiratory health effects with dampness and mold in homes *Indoor Air* 17 284-96.
- Gezondheidsraad 2017, Gezondheidsrisico's door nachtwerk, nr.2017-17, Den Haag 24 oktober 2017.
- Houtman, I., M. Douwes, T. de Jong et al. (2008) *New forms of physical and psychological health risks at work*, European Parliament, IP/A/EMPF/ST/2007-19, PE 408.569, Brussels, Belgium.
- Hinson, J., Raven, P., Chew, S. (2010) *The endocrine system*, second edition, Systems of the body, Churchill livingstone Elsevier, printed in China.
- Kim J and de Dear R (2012) Nonlinear relationships between IEQ factors and overall workspace, *Build. Environ.* 49 33-40.
- Kim, D.H. and Bluysen, P.M. (2020) Clustering of office workers from the OFFICAIR study in the Netherlands based on their self-reported health and comfort, *Building and Environment* 176, DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106860.
- Kluizenaar, de, Y., Roda, C., Dijkstra, N.E., Rossati, S., Mandin, C., Millhuc, V.G., Hanninen, O., de Oliveira Fernandes, E., Silva, G.V., Carrer, P., Bartzis, J., Bluysen, P.M. (2016) Office characteristics and dry eye complaints in European workers – The OFFICAIR study, *Building and Environment* 102: 54-63.
- Lewtas J (2007) Air pollution combustion emissions, *Mutat. Res-Rev.* 636 95-133.
- Marken Lichtenbelt, van W.D., J.W. Vanhommerig, N.M. Smulders, B.S. Drossaerts, G.J. Kemerink, N.D. Bouvy, P. Schrauwen et al. 2009. "Cold-activated brown adipose tissue in healthy men." *The New England Journal of Medicine*, 360:1500-8.
- Morawska L, Tang J, Bahnfleth W, Bluysen PM, Boerstra A, Buonanno G, Cao J, Dancer S, Floto A, Franchimon F, Haworth C, Hogeling J, Isaxon C, Jimenez JL, Kurnitski J, Li Y, Loomans M, Marks G, Marr LC, Mazzarella L, Melikov AK, Miller S, Milton D, Nazaroff W, Nielsen PV, Noakes C, Peccia J, Querol X, Sekhar C, Seppänen O, Tanabe S, Tellier R, Tham KW, Wargocki P, Wierzbicka A, Yao M (2020) How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? *Environment International*,

DOI: 10.1016/j.envint.2020.105832

- NEN (2019) *Energieprestatie van gebouwen - Deel I: Binnenmilieu gerelateerde input parameters voor ontwerp en beoordeling van energieprestatie van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek*, NEN-EN 16798-1, Delft.
- Torresin S, Pernigotto G, Cappelletti F, Gasparella A (2018) Combined effects of environmental factors on human perception and objective performance: A review, *Indoor Air* 28 525-38.
- Zhang D and Bluysen PM (2019b) Actions of primary school teachers to improve the indoor environmental quality of classrooms in the Netherlands, *Intelligent Buildings International*, DOI: 10.1080/17508975.2019.1617100.
- Zhang D, Ortiz M, Bluysen PM (2019a) Clustering of Dutch school children based on their preferences and needs of the IEQ in classrooms, *Build. Environ.* 147 258-66.