

Robuustheid van gebouwen en luchtbehandelings- installaties

Uit epidemiologische onderzoeken blijkt dat gebruikers van kantoorgebouwen met complexere luchtbehandelingsinstallaties, dat wil zeggen systemen met meer technische apparatuur om het binnenmilieu te beheersen en regelen, meer klachten hebben. Deze klachten omvatten niet alleen lichamelijk symptomen [1], [2], maar ook klachten over de binnenluchtkwaliteit en het thermisch comfort [3], [4]. Omdat deze complexere systemen meestal in de eerste plaats gericht zijn op een betere naleving van bepaalde normen op het vlak van gezondheid en comfort, is het merkwaardig dat het aantal klachten daar hoger is. De meest gehanteerde verklaring voor dit verschijnsel is dat complexere luchtbehandelingsinstallaties meer mogelijke bronnen van binnenluchtvervuiling bevatten, zoals filtersecties, koelsecties, bevochtigers en warmte-wielen. De auteurs van dit artikel erkennen dat dit op zichzelf juist is, maar stellen dat het slechts een deel van de verklaring vormt, en dat een meeromvattende verklaring kan worden geponeerd.

-door drs. J.L. Leyten en ing. S.R. Kurvers***

Het uitgangspunt voor een meeromvattende verklaring is het besef dat het hier gaat om een discrepantie tussen een hoog prestatieniveau van bepaalde technologieën in het ontwerpstadium en in de testkamer, en een onverwacht lage prestatie van diezelfde technologieën in praktijksituaties. Bovendien is deze

discrepantie niet in alle gevallen even groot. Minder complexe luchtbehandelingssystemen lijken, vooral wanneer ze worden gecombineerd met een geschikte bouwfysica, beter te voldoen aan de verwachtingen van de gebruikers. Deze discrepantie tussen prestatie in de theorie en in de praktijk vestigt de aandacht op een analoge situatie in



Dr. J.L. Leyten



Ing. S.R. Kurvers

*BBA Binnenmilieu, Rotterdam

**Faculteit Bouwkunde, Afdeling Bouwtechnologie/
Climate Design and Environment, Technische
Universiteit Delft en Apogeum Binnenmilieu
Consult, Gouda
Dit is een vertaling van "Robustness of buildings
and HVAC systems as a hypothetical construct
explaining differences in building related health
and comfort symptoms and complaint rates",
gepubliceerd in Energy and Buildings 38
(2006) 701-707.

een andere discipline, namelijk de statistiek. Bij statistische technieken om parameters te schatten of hypothesen te toetsen worden vaak zeer specifieke wiskundige aannames verondersteld waar te zijn. De meest gangbare aanname is waarschijnlijk dat variabelen normaal verdeeld zijn. Aan deze aannames wordt in de onderzoekspraktijk echter zelden voldaan. Dit zou natuurlijk een groot probleem zijn als het niet kloppen van de aannames in alle gevallen zou leiden tot onjuiste conclusies. Gelukkig is dat niet het geval. Bepaalde statistische technieken blijken tamelijk ongevoelig te zijn voor het niet uitkomen van hun aannames, terwijl andere daar juist erg gevoelig voor zijn. In de statistiek wordt het vermogen van een bepaalde techniek om nauwkeurige resultaten te leveren, ondanks het feit dat niet aan de aannames wordt voldaan, de robuustheid van die techniek genoemd. Voor statistici is dit vanzelfsprekend een belangrijke maatstaf, want wanneer in een bepaald experiment niet wordt voldaan aan de statistische aannames, zal men een minder geavanceerde maar robuustere techniek prefereren boven een geavanceerdere maar minder robuuste [5].

ROBUUSTHEID

Op dezelfde wijze kan de robuustheid van een kantoorgebouw en een luchtbehandelingsinstallatie worden gedefinieerd als de mate waarin het gebouw of het systeem in een praktijk situatie voldoet aan zijn ontwerpdoelstelling. De auteurs van dit artikel zijn van mening dat vele ontwerpen die vlekkeloos functioneren in het ontwerp stadium en in de testkamer, systematisch minder goed functioneren als ze worden toegepast in een kantoor in de praktijk. Dit kan het gevolg zijn van één of meer van de volgende oorzaken:

Gevoeligheid voor afwijkingen van ontwerp aannames

Bepaalde ontwerpen zijn gevoelig voor (kleine) afwijkingen van ontwerp aannames. Een voorbeeld zijn (gevel)-inductie-units. Bij inductie-units is het erg belangrijk dat de eigenschappen van de units, zoals dimensionering, luchtvolume, temperatuur, soort uitblaasopeningen en luchttoevoerroosters nauwkeurig zijn afgestemd op de eigenschappen van de ruimte, zoals geometrie, plaats van de ramen en interne en

externe warmtebelasting. Een onjuiste afstemming leidt tot verstoring van het stroompatroon en daarmee tot te hoge luchtsnelheden in de gebruikszone. Het is de ervaring van de auteurs van dit artikel dat dergelijke onjuiste afstemmingen zich vaak voordoen in de praktijk. Als tijdens het bouwproces een ander rooster wordt gekozen of een andere plafondstructuur, wat natuurlijk gemakkelijk kan gebeuren, wordt het stroompatroon verstoord. Technisch eenvoudigere verwarmings- en ventilatiesystemen zijn minder gevoelig voor dit soort veranderingen, en daardoor robuuster.

Een ander voorbeeld zijn luchttoevoerroosters in de vloer van werkruimten. Omdat de luchtsnelheden vlakbij deze roosters de comfortnormen waarschijnlijk overschrijden, moeten deze roosters worden geplaatst op een passende afstand van plaatsen waar gebruikers zich kunnen ophouden. Daarvoor moet het vloerplan van de roosters worden afgestemd op de indeling van werkplekken en verkeerszones. Maar als de indeling van de werkplekken moet worden veranderd, bijvoorbeeld om organisatorische redenen, dan kan het gebeuren dat de roosters zich te dicht bij de gebruikers bevinden, wat tot comfortproblemen kan leiden. Een systeem met luchttoevoerroosters in het plafond staat veel meer veranderingen in de indeling toe, en is daardoor robuuster.

Onhaalbare onderhoudseisen

Sommige ontwerpen vereisen meer onderhoud dan andere. Om twee extremen tegenover elkaar te plaatsen: Het vergroten van de warmteaccumulerende bouwmassa, bijvoorbeeld door het toepassen van thermisch open plafonds, om de temperatuuroverschrijdingen door middel van passieve koeling te beperken, is een robuuste maatregel. Als ze eenmaal zijn geïnstalleerd is er nauwelijks onderhoud nodig. Een andere robuuste keuze is vermindering van het raamoppervlak. Aan de andere kant vereisen bijvoorbeeld een koelsectie en de units van een variabel volume-systeem periodiek onderhoud. Bijzonder hoge eisen aan het onderhoud worden gesteld door apparaten waarbij vocht kan leiden tot bacteriegroei, zoals verstuivingsbevochtigers. Dergelijke apparaten verminderen de robuustheid van het systeem. De robuustheid wordt zelfs nog verder verlaagd door onderdelen zoals de condensgoten

van inductie-units, die met bacteriën verontreinigd kunnen zijn. Deze zijn over het hele gebouw verspreid, waardoor de kans dat zij allemaal deugdelijk worden onderhouden aanzienlijk wordt verkleind. Dit kan een gedeeltelijke verklaring zijn voor de vraag waarom uit een veldonderzoek van zestien Duitse kantoorgebouwen [6] is gebleken dat ongeveer een derde van de onderzochte niet-inductiesystemen deugdelijk was onderhouden, terwijl van de inductiesystemen, die ook ruimschoots in de steekproef waren vertegenwoordigd, er geen enkele goed was onderhouden. Over het algemeen vereisen maatregelen die de bouwfysica optimaal benutten minder onderhoud en zijn zij daarom robuuster dan ingewikkelder luchtbehandelingssystemen, en zijn gecentraliseerde systemen robuuster dan gedecentraliseerde.

Integratie van verwarming en ventilatie

Als de verwarming en ventilatie op een of andere wijze geïntegreerd zijn, lijken zij vatbaarder te zijn voor slecht functioneren dan systemen waarbij de verwarming en ventilatie zoveel mogelijk gescheiden zijn. Een voorbeeld zijn inductie-units waarbij een vermindering van de luchttoevoer, bijvoorbeeld om tocht of geluidhinder te voorkomen, ook de verwarmings- of koelcapaciteit kan verminderen. Een ander voorbeeld zijn variabel volume-systemen, waarbij het regelen van de luchttoevoer met het oog op het constant houden van de binnentemperatuur kan leiden tot onvoldoende luchttoevoer (zie de volgende paragraaf).

Regeling luchttoevoervolumes

Eén van de belangwekkende conclusies van de Europese IAQ Audit [7] was dat in systemen met recirculatie van de afvoerlucht de feitelijke hoeveelheid gerecirculeerde lucht in de meeste gevallen aanzienlijk hoger of lager was dan de gespecificeerde hoeveelheid. Daardoor wordt niet alleen nogmaals gewezen op de risico's van recirculatie, maar ook herinnerd aan het feit dat de luchttoevoervolumes in de praktijk misschien niet zo nauwkeurig worden geregeld als we graag denken. Met andere woorden: het regelen van luchttoevoervolumes vermindert de robuustheid. Dit is met name het geval bij variabel volume-systemen waarbij de apparaten voor de beheersing van de

luchtvolumes over het hele gebouw verspreid zijn, zodat een adequate beheersing en onderhoud nauwelijks uitvoerbaar zijn. In geval van variabel volumesystemen worden de luchtvolumes geregeld om de kamertemperatuur te beheersen, dus dit is tevens een geval van integratie van verwarming en ventilatie, zoals in de vorige paragraaf besproken.

Te weinig transparantie voor gebruikers en gebouwbeheerders

Een luchtbehandelingsysteem is transparant wanneer (relatieve) leken een zeker basisinzicht kunnen verwerven in de werking van het systeem alleen al door het te bekijken en te gebruiken, en wanneer zij tevens kunnen zien dat het systeem niet goed werkt en tot op zekere hoogte weten wat er mis mee is. Voorbeelden daarvan zijn:

- de meeste leken hebben een basisinzicht in de werking van verwarmingsradiatoren. Veel storingen bij radiatoren kunnen worden opgemerkt door de gebruikers: de radiator wordt helemaal niet warm, de radiator wordt nooit warmer dan lauw, de thermostaat kan niet worden verdraaid, de stand van de thermostaat lijkt geen invloed te hebben op de radiator;
- de werking van een te openen raam is ook voor de meeste mensen begrijpelijk. Je kunt direct zien hoe ver het open staat, maar ook of er wel of geen kierstanden kunnen worden ingesteld, of het vastzit en of het bijvoorbeeld de binnenzonwering hindert. Als te openen ramen tocht veroorzaken, kan meestal gemakkelijk worden vastgesteld om welke ramen het gaat, en hoe ver zij open staan als ze problemen veroorzaken;
- als een buitenzonwering niet goed werkt, merken gebruikers dat meteen. (Buitenzonwering is een voorbeeld van een maatregel op het niveau van bouwfysica die onderhoud vergt, maar waar het ontbreken van deugdelijk onderhoud snel genoeg zal worden ontdekt, vanwege de hoge mate van transparantie voor de gebruikers).

Vergelijk dit met variabel volume-systemen waarbij het soms zelfs voor experts moeilijk is om een idee te krijgen van wat er aan de hand is bij klachten. Verwarmingsradiatoren en te openen ramen zijn daarom transparanter voor

gebruikers en gebouwbeheerders dan ingewikkeldere airconditioningsystemen. De cruciale factor is dat de transparantie van een luchtbehandelingsysteem de klachtenbehandeling enorm vergemakkelijkt. Als de gebruikers bij de gebouwbeheerder met klachten komen als “de radiator blijft koud” of “het raam zit vast” in plaats van “ik heb het altijd koud hier” of “het is hier zo bedompt”, dan is de kans dat de klachten door de gebouwbeheerder serieus worden genomen en juist geïnterpreteerd veel groter. En daarmee ook de kans dat de gebouwbeheerder, die vaak zelf relatief een leek is, de juiste informatie geeft aan eventueel ingeschakelde externe experts.

HOE TOETSEN

Het idee dat gebouwen en luchtbehandelingsinstallaties systematische verschillen kunnen vertonen tussen de prestatie in theorie en die in de praktijk, en dat deze verschillen belangrijke implicaties hebben voor het vóórkomen van aan het gebouw gerelateerde gezondheidssymptomen en comfortklachten van gebruikers, moet natuurlijk worden getoetst, los van de tot nu toe aangevoerde argumenten. Hoe waardevol laboratoriumonderzoeken in het algemeen ook zijn, zij zijn voor dit doel van beperkt nut, omdat de effecten van robuustheid naar verwachting zullen worden aangetroffen in veldsituaties. De meest directe manier zou daarom veldonderzoeken onder een groot aantal gebouwen zijn, waarbij niet alleen gegevens worden verzameld over gebouwen werkplekkenmerken, metingen en klachten van gebruikers, maar ook diepgaand onderzoek wordt verricht naar de prestatie van de luchtbehandelingsinstallaties en een gedetailleerde diagnose van de klachten wordt gesteld. Een dergelijke benadering valt buiten de reikwijdte van dit artikel. De meeste tot nu toe uitgevoerde veldonderzoeken omvatten geen diepgaande onderzoeken naar de luchtbehandelingsinstallatie of gedetailleerde diagnoses. Voorlopig zullen er echter drie alternatieve manieren worden beschreven waarop de robuustheidshypothese kan worden getest zonder uitgebreide gegevensverzameling.

Wordt de robuustheidshypothese ondersteund door de praktijkervaring en de intuïtie van deskundigen?

Allereerst kan de robuustheidshypothese worden getest door een grote groep deskundigen met praktijkervaring, systematisch te vragen of de hypothese overeenkomt met hun intuïties en veldervaring, bijvoorbeeld met een vragenlijst. Verwacht wordt dat deze deskundigen zich door hun praktijkervaring steeds meer bewust zullen worden van het verschil tussen de in theorie verwachte prestatie van een systeem, en de werkelijke prestatie. Een dergelijk onderzoek valt buiten de reikwijdte van dit artikel. Er worden daarvoor in de plaats enkele voorbeelden gegeven.

In zijn plenaire verhandeling bij Healthy Buildings/IAQ '97 gaf Donald Holte, de toenmalige voorzitter van de ASHRAE, aan dat hij de indruk had dat problemen met binnenluchtkwaliteit waren toegenomen sinds men was begonnen verwarming en ventilatie te integreren. In [8] presenteren Leamen en Bordass een standpunt op basis van veldervaring dat in vele opzichten parallellen vertoont met de ideeën in dit artikel.

Twee citaten: “As buildings get bigger, they are able to perform more functions and pack more people in, but the penalty is increased operational complexity which creates a greater likelihood of failure – especially chronic performance problems”. “Our experience with monitoring and troubleshooting studies of UK buildings is that the key to success with building performance lies with managing downsides effectively. Generally this involves (...) keeping technology within thresholds of affordable manageability, so that the inevitable revenge effects can be identified and coped with before they develop into insidious chronic defects”.

In [9] hebben deze auteurs een standpunt dat sterke gelijkenis vertoont met het concept van “transparantie” zoals in dit artikel gepresenteerd: “... people need simple and clear technical interfaces, effective and unambiguous decision-making hierarchies, and, when they want to make interventions, rapid responses and predictable outcomes. Potentially this can be done by first-rate managers with godlike powers – as is often envisaged by designers – but these are few and far between”.

In [10], een literatuuroverzicht van veldonderzoeken, noemen Seppänen en Fisk het volgende veronderstelde

Gebouwtypes op volgorde van aantal klachten	Gevoeligheid voor afwijkingen van ontwerp-aannames	Onderhoud koelsectie	Integratie verwarming + ventilatie	Regeling luchttoevoervolumes	Ontbreken van transparantie voor gebruikers	Totaal robuustheidsminpunten
Natuurlijke/mechanische ventilatie						0
Mechanische ventilatie + koeling		1			1	2
Inductie-units	1	2	1		2	6
Variabel volume-systemen	1	1	1	1	3	7
Fancoilunits	1	2	1		2	6

Vergelijking van volgorde van gebouwsoorten volgens aantallen klachten en minpunten voor robuustheid.

- TABEL 1 -

extra risico van gedecentraliseerde luchtbehandelingssystemen: "Potentially poorer maintenance because components are more numerous or less accessible. Potentially more equipment failures because of larger number of components". Ten slotte kiezen Pejtersen e.a. in [11], een interventieonderzoek, expliciet voor vervanging van een all air-systeem door gescheiden verwarming en ventilatie, om de omstandigheden te verbeteren.

Kan de robuustheidshypothese de huidige resultaten van veldonderzoeken mede verklaren?

Uit de meeste veldonderzoeken blijkt dat de gemiddelde aantallen symptomen en comfortklachten hoger zijn naarmate de luchtbehandelingsinstallaties geavanceerder zijn en/of meer mogelijke luchtvervuilingsbronnen bevatten [1], [2], [3], [4], [12]; een overzicht is te vinden in [10]. [13] concludeert uit een overzicht van epidemiologische onderzoeken dat het vóórkomen van gebouwgerelateerde symptomen toeneemt met de complexiteit van het luchtbehandelingssysteem, wat de robuustheidshypothese ondersteunt. Daaraan wordt toegevoegd dat een verklaring daarvoor kan liggen in het feit dat meer complexiteit leidt tot moeilijker onderhoud, wat deel uitmaakt van de robuustheidshypothese in dit artikel. Maar het argument kan nog specifiekere worden gemaakt. Wanneer de resultaten van [12] en de ruwe gegevens van [3] worden gecombineerd, wat mogelijk is omdat zij bepaalde gebouwcategorieën gemeen hebben, is

de rangorde van gebouwtypes wat betreft aantallen klachten als volgt (hoger nummer betekent meer klachten):

1. natuurlijke ventilatie / mechanische ventilatie met te openen ramen + radiatoren;
2. mechanische ventilatie met te openen ramen + eenvoudige koeling + radiatoren;
3. inductie-units + gesloten gevel;
4. variabel volume-systemen (VAV) + gesloten gevel;
5. fancoilunits + te openen ramen of gesloten gevel.

Kan deze volgorde nu (deels) worden verklaard door verschillen in robuustheid? Om deze vraag te beantwoorden is een aantal dimensies van robuustheid gedefinieerd, en zijn aan gebouwtypes minpunten toegekend voor het ontbreken van robuustheid. Deze minpunten staan ook op een rangordeschaal. De dimensies zijn:

- gevoeligheid voor afwijkingen van de ontwerp-aannames: één minpunt voor inductie-units, VAV-systemen en fancoilunits;
- onderhoud koelsecties: één minpunt voor gecentraliseerde koelsecties (eenvoudige koeling en VAV-systemen) en twee minpunten voor gedecentraliseerde koelsecties (inductie-units en fancoilunits), omdat die meer onderhoud vergen;
- integratie van verwarming en ventilatie: één minpunt voor inductie-units, VAV-systemen en fancoilunits;
- regeling luchttoevoervolumes: één minpunt voor VAV-systemen;
- te weinig transparantie: natuurlijke ventilatie en mechanische ventilatie

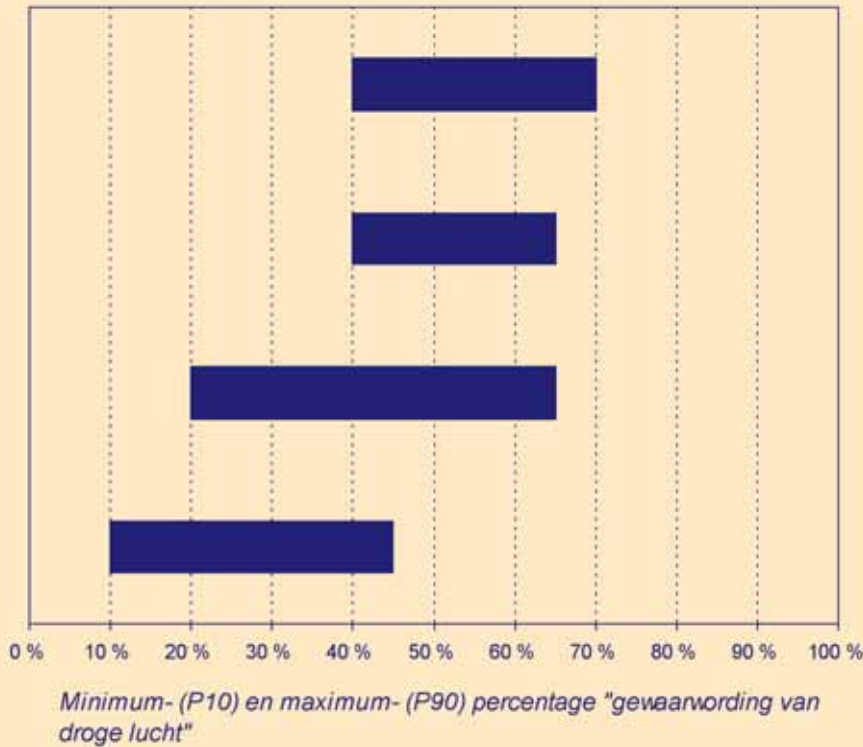
met te openen ramen + radiatoren worden beschouwd als volledig transparant voor de gebruikers en gebouwbeheerders, één minpunt voor eenvoudige koeling, twee minpunten voor inductie- en fancoilunits en drie minpunten voor VAV-systemen.

De resultaten zijn te vinden in tabel 1. Hieruit blijkt dat de rangorde op basis van het ontbreken van robuustheid redelijk goed overeenstemt met de volgorde volgens comfortklachten en gezondheidssymptomen. Hoewel dit een ruwe vergelijking is, wijzen deze resultaten in de voorspelde richting.

Kan de robuustheidshypothese bijdragen aan voorspelling van de prestatie van gebouwen in de ontwerpfase?

Eén van de vele gebouwen die de auteurs van dit artikel in opdracht hebben beoordeeld, was het ontwerp voor een grootschalig nieuw kantoorgebouw dat ongeveer 2.000 gebruikers moest huisvesten. (Een volledig rapport van dit project is te vinden in [14].) Hoewel het ontwerp voldeed aan alle wetgevingsnormen besloten de schrijvers het ontwerp ook te beoordelen op basis van de resultaten van epidemiologische onderzoeken en hun eigen veldervaring. Op die manier voorspelden zij onder meer dat het luchtbehandelingssysteem dat zou worden geïnstalleerd, zou resulteren in thermische klachten en klachten over de binnenlucht kwaliteit, en problemen met de temperatuurbestuur. Eén van de oorzaken van de verwachte problemen was een te geringe robuustheid. Oorspronkelijk zou

HVAC-systeem



De relatie tussen de categorie luchtbehandelingssysteem en het minimum- (P10) en maximumpercentage (P90) klachten over "droge lucht", op basis van de ruwe gegevens van [3].

- FIGUUR 1 -

het gebouw worden uitgerust met een combinatie van verwarmingsradiatoren onder de ramen en koelconvectoren in de plafonds. Later werd besloten plafondinductie-units te installeren, die zowel zouden koelen als verwarmen. De ontwerpers hadden gekozen voor koelconvectoren en later voor inductie-units omdat zij waren uitgegaan van een hoge interne warmtebelasting van 45 W/m^2 en vanwege het ontbreken van externe zonwering. Verder is het in Nederland minder gebruikelijk geworden om warmteaccumulerende gebouwmassa toe te passen voor passieve koeling. De auteurs van dit artikel hebben de ervaring dat inductie-units een hoger risico op klachten van gebruikers met zich meebrengen dan eenvoudigere luchtbehandelingssystemen. Zoals al gesteld, wordt aangenomen dat dit in elk geval voor een deel wordt veroorzaakt door een te geringe robuustheid, als gevolg van overgevoeligheid voor afwijkingen van ontwerp-aannames, onhaalbare onderhoudseisen en integratie van verwarming en ventilatie. Deze ervaring wordt ondersteund door de resultaten in figuur 1, die is afgeleid van dezelfde ruwe gegevens als gebruikt in [3]. Het laagste uiteinde van de staaf staat voor de P10 en het hoogste uiteinde voor de P90 van de

verdeling van percentages klachten over "droge lucht" per gebouw. "Droge lucht" correleert sterk met thermische klachten en klachten over de binnenluchtkwaliteit en gezondheid in kantoorgebouwen en is daardoor een goede maat voor de kwaliteit van het binnenklimaat als geheel [15].

Een ander deel van het probleem met inductie-units is, dat zij geen stralingsverwarming leveren. Daarom zijn hogere luchttemperaturen nodig voor thermisch comfort, wat tot een hogere enthalpie en daardoor een lagere ervaren binnenluchtkwaliteit leidt [16]. Uit testkamerresultaten is gebleken dat met het geplande systeem de luchttemperatuur in het verwarmingsseizoen gewoonlijk $22 \text{ }^\circ\text{C}$ zou zijn, en de gemiddelde stralingstemperatuur $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Het weglaten van de radiatorpanelen had meer gevolgen. De handleiding van de inductie-units meldt dat de maximale PMV in het verwarmingsseizoen als gevolg van het ontbreken van radiatorpanelen $-0,3$ bedraagt. Dit betekent minder veiligheidsmarge in onvoorziene omstandigheden. Daarnaast werd verwacht dat dit de mogelijkheden voor de gebruikers om de temperatuur te beheersen zou verminderen. Verder wordt bij inductie-units over het algemeen de mate waarin de

temperatuur kan worden beïnvloed door de gebruikers als laag ervaren. In de testkamer lieten de inductie-units lage luchtsnelheden in de gebruikszone zien ($< 0,1 \text{ m/s}$). De ervaring van de auteurs is echter dat het stroompatroon van inductie-units erg gevoelig is voor kleine afwijkingen van de ontwerp-principes (= te geringe robuustheid) en dat het in een praktijksituatie over het algemeen niet haalbaar blijkt te zijn om lage luchtsnelheden in alle kamers te realiseren. Positieve aspecten van de luchtbehandelingsinstallatie waren het ontbreken van bevochtiging, recirculatie en warmtewielen. Van de te openen ramen werd ook een positief effect verwacht, hoewel dit effect werd vermindert door het ontbreken van mogelijkheden het raam op verschillende kierstanden in te stellen. Daarom werd verwacht dat de aantallen klachten iets lager zouden zijn dan in gewone gebouwen met inductie-units. Meer specifiek: in het onderste derde deel van de verdeling, wat betekent dat er tussen de 40 en 50 % klachten over "droge lucht" werden verwacht. Al met al werden de volgende effecten van het gekozen luchtbehandelingssysteem verwacht:

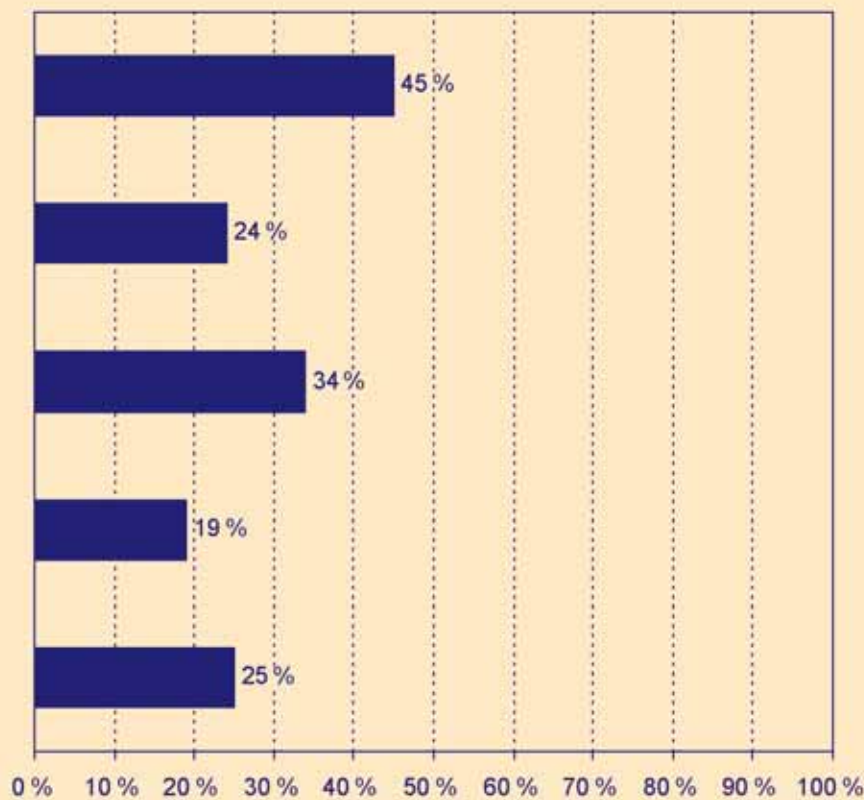
- 40 tot 50 % klachten over droge lucht;
- een verhoogd niveau ($> 10\text{-}20 \%$) thermische klachten, inclusief tocht;
- een verhoogd niveau ($> 10\text{-}20 \%$) klachten over beïnvloedbaarheid van de temperatuur.

Daarom werd geadviseerd een combinatie van radiatorpanelen, een eenvoudige mechanische ventilatie en (indien onvermijdelijk) een eenvoudige mechanische koeling of liever nog stralingskoeling te installeren. Dit is mogelijk door een lagere en realistischere interne warmtebelasting te veronderstellen (25 W/m^2 is haalbaar met een zorgvuldige keuze van verlichting en kantoorapparatuur), en door externe zonwering en meer warmteaccumulerende gebouwmassa toe te passen. Deze maatregelen werden niet uitgevoerd. Twee jaar later werden de auteurs opnieuw in de arm genomen om een evaluatie na ingebruikname te verrichten, in het inmiddels gereede gebouw, met inbegrip van een onderzoek door middel van een vragenlijst. Hieruit bleek dat de resultaten van het onderzoek in hoge mate overeenkwamen met de voorspellingen die de auteurs hadden gedaan. Figuur 2 toont de resultaten voor de klachten over "droge lucht" en

thermisch comfort. De 45 % klachten over “droge lucht” bevinden zich precies in het midden van de verwachte bandbreedte (40-50 %). De thermische klachten zijn allemaal verhoogd, zoals voorspeld naar aanleiding van de werking van het luchtbehandelingssysteem. (Opgemerkt moet worden dat de klachten over tocht ook kunnen zijn veroorzaakt door het ontbreken van mogelijkheden het raam op kierstanden in te stellen). Figuur 3 laat het oordeel van de gebruikers over de beïnvloedbaarheid van de temperatuur zien. De ervaren beïnvloedbaarheid is inderdaad laag, zoals verwacht. Nogmaals wordt benadrukt dat dit gebouw in de ontwerpfase voldeed aan alle ISO-normen en Nederlandse wetgeving en normen. Bovendien waren de architect en de adviseurs gekozen met het oog op het creëren van een state of the art-project. De in deze paragraaf genoemde resultaten vormen geen zeer strenge toetsingen van de robuustheidshypothese. Maar zij bevestigen voorlopig de vruchtbaarheid ervan wel voldoende om verder onderzoek te rechtvaardigen.

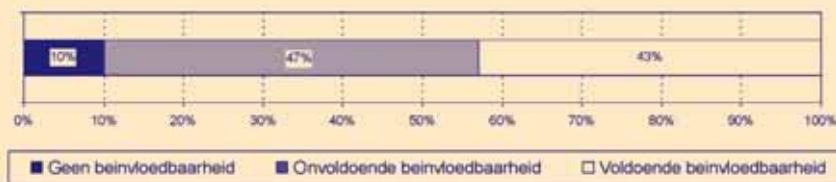
BRONBEHEERSING

Er bestaat brede consensus dat de beheersing van verontreinigende bronnen ruimschoots te prefereren is boven meer ventilatie of persoonlijke bescherming [17]. Vanuit een zuiver theoretisch standpunt, is dat niet vanzelfsprekend. Als ons doel is de blootstelling tot een bepaald maximum te beperken, zou dat theoretisch gesproken net zo goed kunnen worden gerealiseerd door meer ventilatie of persoonlijke bescherming, als met bronbeheersing. De diepere reden voor het prefereren van bronbeheersing moet dus zijn dat wanneer de bron wordt verwijderd, men er heel zeker van kan zijn dat er geen sprake is van blootstelling, maar wanneer meer ventilatie of persoonlijke bescherming wordt toegepast, het nog steeds mogelijk is dat er sprake is van blootstelling als gevolg van praktische problemen, bv. onvoldoende ventilatie, onvoldoende effectiviteit van de ventilatie, slijtage van persoonlijke beschermingsmiddelen, naast het feit dat een verhoogde ventilatie de emissie bij bepaalde verontreinigingsbronnen doet toenemen [18]. Met andere woorden: de diepere reden om bronbeheersing te prefereren is omdat het robuuster is.



Klachten over “droge lucht” en thermisch comfort.

- FIGUUR 2-



Beïnvloedbaarheid van de temperatuur als ervaren door gebruikers

- FIGUUR 3-

ONTWERPMIDDELEN VERSUS -DOELEN

In Nederland bestaat de trend om ontwerp-specificaties voor nieuwe gebouwen te beperken tot specificaties van ontwerpdoelen (prestatiespecificaties) en specificaties van ontwerp-middelen uit te sluiten. Deze trend wordt expliciet gesteund door [19]. De belangrijkste reden die daarvoor wordt genoemd is dat specificaties van middelen technologische innovaties en ontwerp-vrijheid in de weg kunnen staan, terwijl specificaties van doelen dat niet doen. Toegegeven moet worden dat er in het verleden misschien te veel vertrouwd is op specificaties van middelen, en dat dit af en toe heeft geleid tot suboptimale situaties.

Maar de zaken zijn complexer:

- Allereerst kunnen specificaties van

doelen innovatie net zo goed in de weg staan als specificaties van middelen. Twee voorbeelden:

- De huidige Nederlandse norm voor thermisch comfort vereist dat de PMV-waarde van +0,5 niet meer dan 5 % van de werktijd wordt overschreden, of een daarmee overeenkomende overschrijding in GTO. Uit recent onderzoek blijkt echter dat gebruikers van gebouwen met te openen ramen en zonder mechanische koeling aanzienlijk grotere temperatuuroverschrijdingen accepteren [20]. Dit opent de mogelijkheid om in veel gevallen comfortabele gebouwen te ontwikkelen zonder mechanische koeling, mits de juiste omstandigheden worden gecreëerd. Maar deze innovatie

wordt uitgesloten door de huidige norm, een doelspecificatie.

- De Nederlandse normen voor ventilatiehoeveelheden in kantoorruimten variëren van 30 tot 40 m³/s per persoon. Dit komt overeen met de 36 m³/s per persoon die internationaal wordt geaccepteerd. Uit [21] blijkt dat wanneer de enthalpie van de lucht relatief hoog is (45-58 kJ/kg), deze ventilatiehoeveelheid zeker nodig is. Maar wanneer de enthalpie relatief laag is (35 J/kg, in dit geval 20 °C en 40 % RH) blijkt een ventilatiehoeveelheid van ca. 12 m³/s per persoon voldoende te zijn voor een acceptabele binnenluchtkwaliteit (aantal ontevreden <10 %), zelfs met realistische verontreinigingsniveaus. Dit biedt de mogelijkheid gebouwen te ontwikkelen met lagere ventilatiehoeveelheden, door de stralingstemperaturen te verhogen en de luchttemperaturen te verlagen en/of door de toegevoerde lucht te ontvochtigen. Maar ook deze innovatie wordt uitgesloten door de huidige normen, die duidelijk specificaties van doelen zijn.
- Ook de ontwerp-specificaties die expliciet zijn afgestemd op het principe van “uitsluitend doelspecificatie” bevatten specificaties van middelen. Voorbeelden:
 - De specificaties die expliciet worden ondersteund door [19] bevatten de eis dat werkplekken te openen ramen hebben. Strikt genomen is dit een specificatie van een bepaald middel.
 - Dezelfde ontwerp-specificaties bevatten een verbod op recirculatie van afvoerlucht tijdens werkuren. Dit is duidelijk een specificatie van middelen, omdat een echte doelspecificatie alleen een bepaald maximaal luchtverontreinigingsniveau zou hebben geëist.
- Specificaties van doelen kunnen alleen de prestatie van een ontwerp in de ontwerp-fase specificeren, en niet de prestatie in de praktijk. Als daartussen een discrepantie bestaat (met andere woorden: als de robuustheid te laag is) kunnen doelspecificaties alleen niet zorgen voor een goede prestatie. In dat geval zijn aanvullende specificaties van middelen (bv. bronbeheersing, scheiding van verwarming en ventilatie) nodig om de robuustheid te verhogen en een goede

de prestatie in de praktijk te garanderen.

- Zoals al aangegeven bestaat er brede consensus dat bronbeheersing een heel belangrijk, zo niet onmisbaar middel is om een goede binnenluchtkwaliteit te verzekeren. Maar bronbeheersingsstrategieën opnemen in de ontwerp-specificaties voor nieuwe gebouwen is niet verenigbaar met de strikte naleving van het principe van “uitsluitend doelspecificaties”.

Kortom, het onderscheid tussen doelen en middelspecificaties is niet zo scherp als op het eerste gezicht lijkt, en een streng verbod op specificatie van middelen staat een maximale bescherming van de gezondheid in de weg. De auteurs van dit artikel zijn van mening dat de ontwerp-specificaties voor een nieuw gebouw altijd een afgewogen mix moeten zijn van middel- en doelspecificaties. Deze mix moet zodanig worden afgestemd dat zowel de gezondheid als de productiviteit gegarandeerd zijn, en dat de mogelijkheden voor innovatieve ontwerpen en technologieën optimaal worden benut.


CONCLUSIES

Robuustere gebouwen kunnen in zekere zin vaak technisch minder geavanceerd zijn (de lo-tech versus hi-tech discussie onder architecten). Dit lijkt misschien een stap terug, als het gaat om gezondheid en comfort. Maar de maatregelen die nodig zijn voor een hoge robuustheid lopen perfect in de pas met recente ontwikkelingen in binnenmilieuonderzoek:

- Een hoge robuustheid houdt een strikte beheersing van verontreinigingsbronnen in, met inbegrip van bevochtigers. Er bestaat steeds meer consensus dat zelfs zeer lage relatieve vochtigheden (tot 15 %) geen probleem vormen, maar dat gemiddelde tot hoge relatieve vochtigheden (boven de 40 %) dat wel zijn [16], [21], dus bevochtigers kunnen vermeden worden [15].
- Een hoge robuustheid houdt ook beheersing van warmtebronnen in en een voorkeur voor passieve koeling. De mogelijkheden om dat te realiseren zijn toegenomen door de resultaten van [20] waaruit blijkt dat de gebruikers van gebouwen zonder koeling maar met te openen ramen hogere temperatuuroverschrijdingen

accepteren dan door het PMV-model voorspeld.

- Robuustheid neemt toe door scheiding van warmte en ventilatie. Een voor de hand liggende manier om dat te realiseren is stralingswarmte toe te passen. Bij een juiste toepassing zal dat lagere luchttemperaturen mogelijk maken, en daarmee lagere enthalpie en hogere ervaren kwaliteit van de binnenlucht [16], [21].
- Een hogere robuustheid betekent een voorkeur voor bouwfysica boven installatietechniek om de binnenmilieukwaliteit te beheersen, een voorkeur voor free running gebouwen boven gebouwen met airconditioning, een voorkeur voor stralingswarmte boven all-air systemen en een integratie van gebouwontwerp met gebruikersgedrag, welke allemaal zullen bijdragen tot een lager energiegebruik.

Er lijkt bezorgdheid te bestaan onder binnenmilieudeskundigen dat de noodzaak van energiebesparing de verbetering van het binnenmilieu in de weg zal staan. Maar energiebesparing en een goede binnenmilieukwaliteit zijn zeer goed verenigbaar [22], en het zijn juist de in dit artikel voorgestelde robuuste oplossingen die dit zullen bevorderen. De noodzaak van energiebesparing vormt geen bedreiging maar een kans. Voorstanders van energiebesparing en een betere binnenmilieukwaliteit moeten elkaar de hand reiken. 

REFERENTIES

1. Mendell, M. J., Smith, A.H. *Consistent Pattern of Elevated Symptoms in Airconditioned Office Buildings: A Reanalysis of Epidemiologic Studies*, Am. J. Public Health 80 (10) (1990) 1193-1199.
2. Teeuw, B. *Sick Building Syndrome – the role of airborne microorganisms and endotoxins*, Universiteit Utrecht, 1993.
3. Preller, L., T. Zweers, J.S.M. Boleij, B. Brunekreef, *Gezondheidsklachten en Klachten over het Binnenklimaat in Kantoorgebouwen*, Directoraat-Generaal van de Arbeid, S 83, 1990.
4. Groes, L. *The European IAQ-Audit Project – A Statistical Analysis of Indoor Environmental Factors*, Laboratory of Heating and Air Conditioning, Technische Universiteit Denemarken, 1995.

5. Hoaglin, D.C. , Mosteller, F. , Tukey, J.W. eds, *Understanding Robust and Exploratory Data Analysis*, John Wiley, New York, 1983.
6. , Bischof, M. Bullinger-Naber, B. Kruppa, B.H. Müller, R. Schwab, *Expositionen und gesundheitliche Beeinträchtigungen in Bürogebäuden*, Fraunhofer IRB Verlag, 2004.
7. Bluysen, Ph.M. , Oliveira Fernandes, E. de , Fanger, P.O. *European Audit Project to Optimise Indoor Air Quality and Energy Consumption in Office Buildings – Eindrapport*, TNO, 1995.
8. Leamen, A. , Bordass, B. *Productivity in buildings: the 'Killer' variables*, in: D. Clements-Croome, *Creating the productive workplace*, E & FN SPON, 2000, 167-191
9. Leamen, A. , Bordass, B. *Building design, complexity and manageability*. *Facilities*, 11 (9) (1993) 16-27.
10. Seppänen, O. , Fisk, W.J. *Association of system ventilation type with SBS symptoms in office workers*, *Indoor Air* 11 (2) (2002) 98-112.
11. J. Pejtersen, H. Brohus, C.E. Hyldgaard, et al., *The effect of renovating an office building on occupants' comfort and health*, *Proceedings Indoor Air '99*, 2, 160-165.
12. Burge, S. , Hedge, A. , Wilson, S. et al., *Sick Building Syndrome: A Study of 4373 Office Workers*. *Annals of Occupational Hygiene* 31 (4A) (1987) 493-504.
13. Mendell, M.J. *Ventilation systems and building related symptom: An Epidemiological Perspective*, NIOSH, USA, gepresenteerd tijdens Healthy Buildings 2000.
14. Kurvers, S.R. , Leijten, J.L. *A comparison of a pre construction judgement of the design and a post occupancy evaluation in a large Dutch office building*, *Proceedings Healthy Buildings 2000*, 4, 347-352.
15. Sundell, J. *Building related factors and health*, *Proceedings Healthy Buildings 2000*, 1, 23-33.
16. Fanger, P.O. *Healthy Buildings with Moderate Enthalpy and low Pollution Load*, in: D.J. Moschandreas, ed., *Design, Construction and Operation of Healthy Buildings*, ASHRAE, 1998, 3-8.
17. CEN, CR 1752 – *Ventilation for buildings – Design criteria for the indoor environment*. Europees Comité voor Standaardisatie, 1998.
18. Bakó-Biró, Z. *Human Perception, SBS Symptoms and Performance of Office Work during Exposure to Air Polluted by Building Materials and Personal Computers*, Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Denemarken, 2004.
19. Rijksgebouwendienst, *Ontwikkeling Basiskwaliteit Rijkshuisvesting '96* Den Haag, 1996.
20. Dear, R.J. de, Brager, G.S. , Cooper, D. *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference*. Eindrapport ASHRAE RP-884, 1997.
21. Fang, L., Wargocki, P., Witterseh, T. et al., *Field study on the impact of temperature, humidity and ventilation on perceived air quality*. *Proceedings Indoor Air '99*, 2, 107-112.
22. Boerstra, A.C. , Leijten, J.L. , Haans, L. *Literatuuronderzoek gebouwgebonden gezondheid, comfort, productiviteit en ziekteverzuim in relatie tot energiegebruik*. Senter-Novem, 2006.

Mistral

Koelen met water als koudemiddel, zonder gebruik te maken van een koelmachine.

Het is mogelijk dankzij een nieuw Thermo Air product: de Mistral luchtbehandelingkasten met StatiqCooling technologie. De Mistral maakt gebruik van een nieuwe vinding op het gebied van koelen; Statisch Indirectwerkende Dauwpuntkoeling. Hierdoor creëert de Mistral een optimaal binnenklimaat met een minimaal energieverbruik.

- Gekoelde ventilatie d.m.v. StatiqCooling Inside
- Een volledig legionella veilig ontwerp
- Zeer lage onderhoudskosten, geen STEK, PED etc.
- Geen koelmachine(s) benodigd
- Extreem laag energieverbruik: tot 75% besparing
- Geen ontvochtiging en dus geen uitdroging van lucht
- Diverse subsidie mogelijkheden

Thermo Air ontwikkelt en produceert al sinds 1947 innovatieve apparatuur die een perfect binnenklimaat creëert. Apparatuur die steeds de grens verlegt: energiezuiniger en innovatiever.

www.thermoair.com
www.statiqcooling.com

StatiqCooling



Creating the perfect environment

Ambachtsweg 18 - 1271 AM Huizen - T 035 524 9000