

OfficeComfort D1.1 Verfijnde methodiek voor bepaling van thermisch comfort

Samenvatting

De utiliteitsbouw is verantwoordelijk voor circa 40% van de energieconsumptie in Nederland. Kantoorgebouwen nemen hiervan 15% voor hun rekening en zijn dus verantwoordelijk voor 6% van de nationale energieconsumptie. Hierdoor spelen kantoorgebouwen een belangrijke rol in de energietransitie. Thermisch comfort vormt een belangrijke schakel in deze energietransitie. Voor verdere energievraagreductie en verschuiving van de energievraag naar tijdstippen met veel duurzaam aanbod, is beter inzicht in het daadwerkelijk thermisch comfort nodig, om gebruikers het gewenste comfortniveau te kunnen blijven bieden en discomfortrisico's tijdig te kunnen detecteren.

Het doel van het TKI project OfficeComfort is om (beïnvloedingsfactoren van) het ervaren thermisch comfort beter te kunnen bepalen ten behoeve van:

- flexibilisering van de energievraag, zodat de instellingen van de klimaatinstallatie verantwoord gevarieerd kunnen worden om maximaal van het variabele aanbod duurzame energie gebruik te kunnen maken;
- energiebesparing, doordat discomfortrisico's tijdig kunnen worden gesignaleerd en hierop kan worden geanticipeerd.

De doelstelling van werkpakket 1, waarvan dit de rapportage is, is om tot een verfijnde methodiek te komen voor de bepaling van thermisch comfort om zo tijdig discomfortrisico's te kunnen signaleren.

De verfijnde methodiek bestaat uit een meetmethodiek voor het meten van de meest cruciale fysische beïnvloedingsfactoren en een evaluatiemethodiek om te bepalen in hoeverre er discomfortrisico's zijn. Daarnaast omvat de verfijnde methodiek een vragenlijst voor periodieke registratie van de subjectieve comfortbeleving. Binnen de verfijnde methodiek wordt geen onderscheid gemaakt naar persoonskenmerken (bijv. mannen/vrouwen), omdat er nog onvoldoende onderbouwing is voor aanpassing van de comfortcriteria aan persoonskenmerken en de verschillen in thermisch comfort binnen een groep vele malen groter zijn dan de verschillen tussen groepen.

Uit het veldexperiment (WP3) is gebleken dat de verfijnde methode tot een gedetailleerd beeld heeft geleid van het ervaren comfort. Het ervaren discomfort bleek in de testperiode echter gering te zijn. Hierdoor is het slechts beperkt mogelijk om uitspraken te doen over de geschiktheid van de verfijnde methode om discomfortrisico's in te schatten. Binnen die beperking, werkt de verfijnde methode goed en kan het ervaren comfort goed op objectieve wijze worden bepaald. Aangeraden wordt de verfijnde methode te evalueren op een locatie waar meer klachten zijn.

Inhoud

SAMENVATTING	2
INHOUD	3
1 INLEIDING	4
1.1 AANLEIDING	4
1.2 DOELSTELLING.....	4
1.3 ONDERZOEKSVRAGEN.....	4
1.4 AANPAK.....	4
1.5 OPBOUW RAPPORT.....	5
2 BEÏNVLOEDINGSFACTOREN THERMISCH COMFORT	6
2.1 INLEIDING	6
2.2 FYSISCHE OMGEVINGSFACTOREN.....	6
2.3 KLEDING, METABOLISME EN ANDERE FYSIOLOGISCHE INVLOEDSFAC-TOREN.....	7
2.4 PSYCHOLOGISCHE FACTOREN	9
2.5 COMFORTCRITERIA	9
3 VERFIJNDE MEETMETHODIEK FYSISCHE BEÏNVLOEDINGSFACTOREN	12
3.1 INLEIDING	12
3.2 TE METEN FYSISCHE FACTOREN.....	12
3.3 MEET SET-UP	13
4 METHODIEK REGISTRATIE SUBJECTIEVE COMFORTBELEVING	14
4.1 METHODIEK REGISTRATIE SUBJECTIEVE COMFORTBELEVING	14
4.2 VRAGENLIJST SUBJECTIEVE COMFORTBELEVING.....	14
5 VERFIJNDE METHODIEK INSCHATTING THERMISCH COMFORT	15
6 VERBETERING METHODIEK O.B.V. EVALUATIE IN DE PRAKTIJK.....	17
7 CONCLUSIES EN DISCUSSIE	19
8 REFERENTIES	21
ANNEX A – SPECIFICATIES SENSORSYSTEEM.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
INLEIDING.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
BEGRIPPEN	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
REQUIREMENTS.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
ANNEX B – VRAGENLIJST SUBJECTIEVE COMFORTBELEVING.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De utiliteitsbouw is verantwoordelijk voor circa 40% van de energieconsumptie in Nederland. Kantoorgebouwen nemen hiervan 15% voor hun rekening en zijn dus verantwoordelijk voor 6% van de nationale energieconsumptie. Hierdoor spelen kantoorgebouwen een belangrijke rol in de energietransitie. Thermisch comfort vormt een belangrijke schakel in deze energietransitie. Voor verdere energievraagreductie en verschuiving van de energievraag naar tijdstippen met veel duurzaam aanbod, is beter inzicht in het daadwerkelijk thermisch comfort nodig, om gebruikers het gewenste comfortniveau te kunnen blijven bieden en discomfortrisico's tijdig te kunnen detecteren.

1.2 Doelstelling

Het doel van het project is om (beïnvloedingsfactoren van) het ervaren thermisch comfort beter te kunnen bepalen ten behoeve van:

- flexibilisering van de energievraag, zodat de instellingen van de klimaatinstallatie verantwoord gevarieerd kunnen worden om maximaal van het variabele aanbod duurzame energie gebruik te kunnen maken;
- energiebesparing, doordat discomfortrisico's tijdig kunnen worden gesignaleerd en hierop kan worden geanticipeerd.

De doelstelling van werkpakket 1, waarvan dit de rapportage is, is om tot een verfijnde methodiek te komen voor de bepaling van thermisch comfort om zo tijdig discomfortrisico's te kunnen signaleren.

1.3 Onderzoeksvragen

Om tot een verfijnde methodiek voor de bepaling van thermisch comfort te komen, worden de volgende onderzoeksvragen beantwoord:

- Welke factoren beïnvloeden het ervaren thermisch comfort? En welke comfortcriteria kunnen hierbij worden gehanteerd?
- Hoe kunnen de fysische beïnvloedingsfactoren die cruciaal zijn voor het ervaren thermisch comfort worden gemeten? Hoe kan een meet set-up voor het meten van deze fysische beïnvloedingsfactoren van thermisch comfort worden vormgegeven?
- Hoe kan het te verwachten ervaren thermisch comfort worden bepaald op basis van fysische metingen en inzichten ten aanzien van overige beïnvloedingsfactoren?
- Hoe kan inzicht worden verkregen in de subjectieve comfortbeleving van de kantoormedewerkers?

1.4 Aanpak

Om de onderzoeksvragen te beantwoorden en tot een verfijnde methodiek voor de bepaling van thermisch comfort te komen is de volgende aanpak gehanteerd:

- Identificatie beïnvloedingsfactoren thermisch comfort;
- Identificatie gewenste randvoorwaarden voor de fysische beïnvloedingsfactoren;

- Ontwikkeling verfijnde meetmethodiek fysische beïnvloedingsfactoren;
- Ontwikkeling methodiek registratie subjectieve comfortbeleving;
- Ontwikkeling verfijnde methodiek inschatting thermisch comfort.

1.5 Opbouw rapport

In dit rapport wordt in hoofdstuk 2 allereerst ingegaan op de verschillende beïnvloedingsfactoren van thermisch comfort in kantoren en de verschillende comfortcriteria worden gehanteerd. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op een verfijnde meetmethodiek om de fysische factoren die bepalend zijn voor thermisch comfort beter in kaart te brengen. In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op een methodiek voor de registratie van de subjectieve comfortbeleving en in hoofdstuk 5 wordt de verfijnde methodiek voor inschatting van het thermisch comfort beschreven. Vervolgens wordt in hoofdstuk 6 aangegeven hoe de methodiek voor bepaling van thermisch comfort naar aanleiding van de evaluatie in de praktijk is bijgesteld. Tot slot worden in hoofdstuk 7 de conclusies besproken en de resultaten bediscussieerd.

2 Beïnvloedingsfactoren thermisch comfort

2.1 Inleiding

Thermisch comfort wordt voor een groot deel bepaald door de mate waarin het menselijk lichaam thermisch in balans is. Deze warmtebalans wordt beïnvloed door de mate van activiteitsniveau en kleding van het lichaam en door de fysische omgeving. Daarnaast zijn ook vele andere factoren, zoals culturele aspecten, individuele voorkeuren, mogelijkheden om zelf invloed uit te oefenen en beleving van de ruimte, van invloed op hoe het thermisch comfort wordt ervaren. Al deze aspecten zullen in dit hoofdstuk kort worden toegelicht.

Thermisch oncomfortabele situaties kunnen ontstaan doordat het lichaam in zijn totaliteit te warm of te koud is (algeheel discomfort) of doordat slechts een gedeelte van het lichaam te warm of te koud is (lokaal discomfort). Voor beide aspecten zijn in de literatuur en (inter)nationale standaarden comfortcriteria opgesteld waarbij een groot deel van de populatie zich comfortabel zal voelen. Doordat er grote individuele verschillen bestaan tussen mensen (zowel qua fysiologie, psychologie als gedrag) zullen er echter altijd mensen zijn die zich niet comfortabel voelen bij deze gemiddelde comfortcriteria. De laatste jaren wordt steeds meer onderzoek gedaan naar deze individuele verschillen in comfortbeleving. De belangrijkste bevindingen hiervan worden in paragraaf 2.3 toegelicht.

2.2 Fysische omgevingsfactoren

De fysische omgevingsfactoren die van belang zijn voor het ervaren thermisch comfort zijn:

- Luchttemperatuur: deze bepaalt de convectieve warmteoverdracht tussen het menselijk lichaam en zijn omgeving.
- Stralingstemperatuur: deze bepaalt de radiatieve warmteoverdracht tussen het menselijk lichaam en zijn omgeving.
- Luchtsnelheid: deze bepaalt de convectieve warmteoverdracht tussen het menselijk lichaam en zijn omgeving.
- Relatieve luchtvochtigheid (RV): de absolute luchtvochtigheid speelt een rol in de warmteoverdracht door verdamping tussen het menselijk lichaam en zijn omgeving. Bij gematigde temperaturen ($<26^{\circ}\text{C}$) en een gematigd activiteitsniveau (<2 met) is de invloed van de luchtvochtigheid op de warmte-afgifte van het lichaam en het waargenomen thermisch comfort echter gering (ISO 7730, 2005). In Nederland is deze parameter daarom minder relevant voor de bepaling van het thermisch comfort.

De combinatie van luchttemperatuur en gemiddelde stralingstemperatuur (de zogenaamde operatieve temperatuur) is het meest bepalend voor hoe de thermische omgeving wordt ervaren. Het is hierbij van belang dat de veranderingen en fluctuaties in de operatieve temperatuur niet te groot zijn. Het overdag oplopen van de temperatuur wordt hierbij als minder hinderlijk ervaren dan het overdag teruglopen van de temperatuur (ISSO 74, 2014). Als de gebruikers echter zelf ervoor kiezen om de temperatuur aan te passen (door gebruik van de thermostaat of openen van ramen) dan gelden er geen beperkingen aan het temperatuurverloop in de tijd.

2.3 Kleding, metabolisme en andere fysiologische invloedsfactoren

De warmtebalans van het menselijk lichaam wordt naast de fysische omgevingsfactoren zoals in voorgaande paragraaf beschreven, ook beïnvloed door de kleding en het metabolisme van de betreffende persoon. Kleding zorgt voor een thermische weerstand tussen het menselijk lichaam en zijn omgeving, waardoor het temperatuurverschil tussen mens en omgeving wordt verlaagd en de warmtestroom naar de omgeving door convectie en straling afneemt.

Het metabolisme betreft de totale hoeveelheid energie die in het lichaam wordt geproduceerd. Het metabolisme betreft zowel het metabolisme in rusttoestand (het basaal metabolisme) als het activiteitsniveau. Kleding en metabolisme verschillen van individu tot individu, waardoor de thermische omgeving door ieder individu anders wordt ervaren. Zo zijn vrouwen in een kantooromgeving vaak lichter gekleed dan mannen (Kim et al., 2013), is het basaal metabolisme bij mannen hoger dan bij vrouwen (Clark en Edholm, 1985) en neemt het basaal metabolisme af naarmate de mens ouder wordt (Clark en Edholm, 1985). De Body Mass Index (BMI) blijkt echter een groter effect te hebben op het metabolisme dan leeftijd en geslacht: naarmate de BMI toeneemt neemt het basaal metabolisme af (Byrne et al., 2005).

De laatste jaren wordt er steeds meer onderzoek gedaan naar verschillen in thermische comfortbeleving tussen personen. Hierbij wordt onder andere gekeken naar de invloed van geslacht, leeftijd, gewicht en adaptatie op de comfortbeleving, zowel in klimaatkamer experimenten als in veldstudies. Veel van deze studies laten zien dat vrouwen vaker ontevreden zijn dan mannen in dezelfde thermische omgeving (Kim et al., 2013; Karjalainen, 2012) en dat vrouwen gevoeliger zijn voor afwijkingen van de optimale temperatuur, vooral onder koele omstandigheden (Karjalainen, 2012). Echter, lang niet alle studies laten een significant verschil zien tussen mannen en vrouwen (Wang et al., 2018).

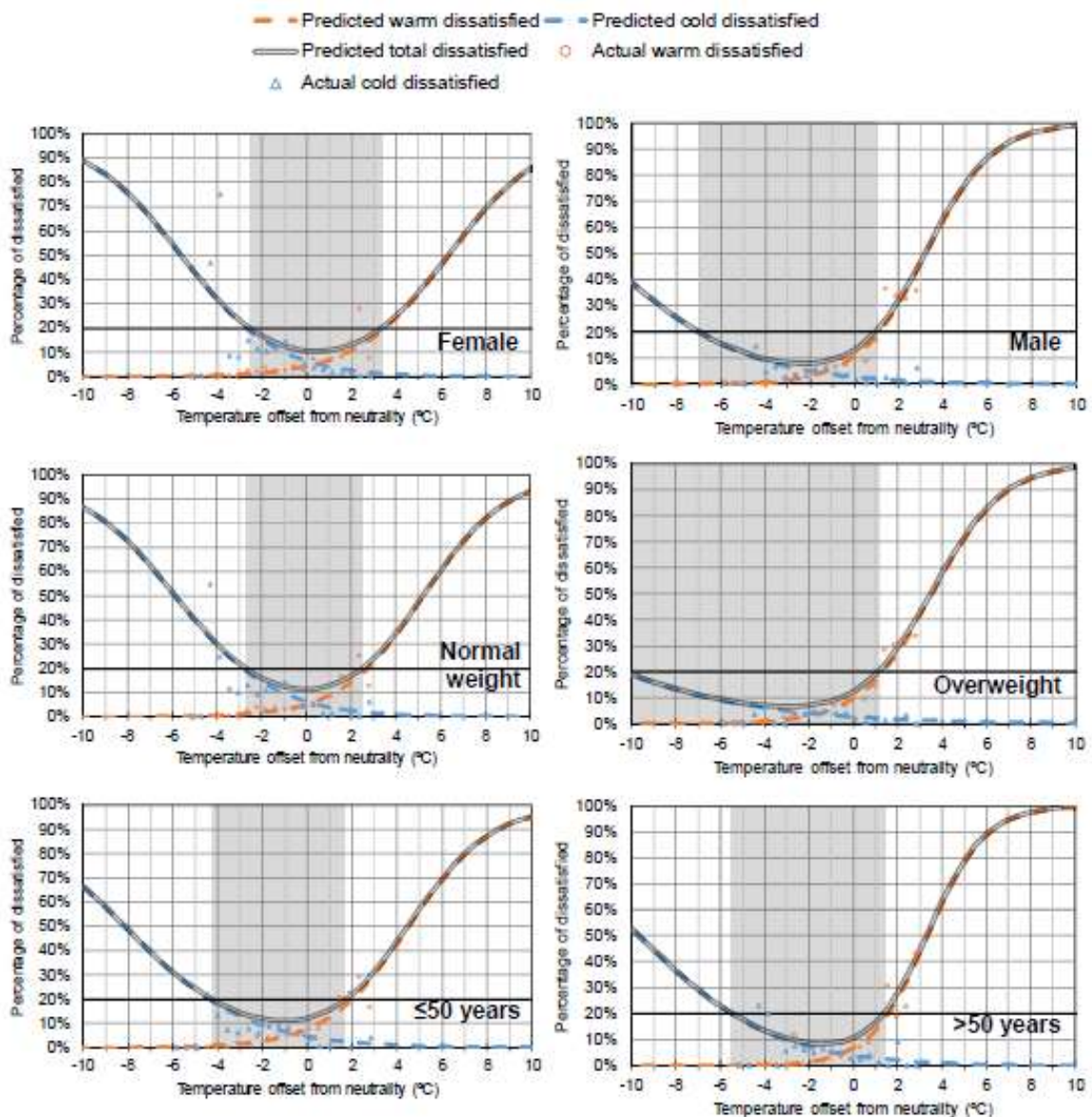
Ook laten studies zien dat leeftijd een effect heeft op de thermoregulatie. Ouderen hebben de voorkeur voor een hogere temperatuur dan jongeren en vertonen meer vasoconstrictie (Schellen et al., 2010). Ouderen reageren minder snel op verstoringen in de thermische balans van het lichaam dan jongeren, waardoor de thermoneutrale zone bij ouderen smaller is dan bij jongeren (Kingma et al., 2012). Ook hier geldt echter dat lang niet alle studies een significant verschil laten zien tussen ouderen en jongeren (Wang et al., 2018).

Uit onderzoek blijkt dat mensen met overgewicht een voorkeur hebben voor koelere omstandigheden dan mensen zonder overgewicht. Dit komt door de isolerende werking van het lichaamsvet (Kingma et al., 2012). Ook de verdeling van het warmteverlies is bij mensen met overgewicht anders dan bij slanke mensen. Mensen met overgewicht hebben in verhouding tot slanke mensen een koudere romp en warmere handen en voeten (Kingma et al., 2012).

Uit onderzoek blijkt ook dat adaptatie een belangrijke invloedsfactor is voor het ervaren thermisch comfort. Mensen die gewend zijn aan air-conditioning hebben

het bijvoorbeeld sneller warm dan mensen die hier niet aan gewend zijn (Rupp et al., 2018).

Rupp et al. (2018) hebben een poging gedaan om de verschillen in thermische comfortbeleving te kwantificeren. Zij hebben 2 jaar lang onderzoek gedaan in kantoren in zuid Brazilië waarbij de fysische aspecten van het thermisch binnenklimaat zijn gemeten en ruim 7500 mensen vragenlijsten hebben ingevuld over hun ervaren thermisch comfort. Uit de resultaten blijkt dat mannen, mensen met overgewicht en mensen die vaak in airconditioned gebouwen werken vaker thermisch discomfort ervaren door warmte vergeleken met vrouwen, mensen zonder overgewicht en mensen die zich minder in airconditioned gebouwen bevinden. Deze laatste groepen geven vaker aan koude discomfort te ervaren. Rupp et al. (2018) hebben hierbij ook onderzoek gedaan naar hoe deze variabelen samenhangen met de breedte van de comfortzone. Deze analyse geeft aan dat verschillende groepen gebruikers een verschillende comfortzone hebben, zie Figuur 1.



Figuur 1. Comfortzones voor verschillende groepen gebruikers van gebruikers, zoals gegeven in Rupp et al. (2018).

Verscheidende onderzoeken laten zien dat er verschillen zijn in comfortbeleving tussen personen, waar bij het ontwerp van een gebouw aandacht voor zou moeten zijn. De spreiding binnen een groep personen blijft echter vele malen groter dan de verschillen tussen de groepen van personen. Het aanpassen van de comfortcriteria aan individuele kenmerken is daardoor met de huidige stand van onderzoek niet mogelijk.

2.4 Psychologische factoren

Psychologische adaptatie speelt een belangrijke rol in hoe de thermische omgeving wordt ervaren. Het gaat hierbij om een veranderde perceptie van, en reactie op binnenkomende prikkels door eerdere ervaringen en verwachtingen (De Dear en Brager, 1998). Volgens Nikopoulou en Steemers (2003) zijn er verschillende factoren die van invloed zijn op de thermische perceptie:

- de mate waarin de omgeving natuurlijk is: in een kunstmatige omgeving tolereert men minder;
- verwachtingen over hoe de omgeving zou moeten zijn: in natuurlijk geventileerde gebouwen verwachten mensen bijv. meer variatie in temperatuur dan in gebouwen met volledige airconditioning;
- eerdere ervaringen: deze beïnvloeden de verwachtingen die mensen hebben;
- blootstellingsduur: als men weet dat de blootstelling maar kortdurend is, dan is men minder snel ontevreden;
- ervaren controle: als mensen zelf hun comfortniveau kunnen beïnvloeden tolereren ze meer en ervaren ze minder discomfort dan wanneer ze geen invloed uit kunnen oefenen;
- 'environmental stimulation': steeds meer onderzoeken geven aan dat mensen de voorkeur hebben voor een dynamische omgeving in plaats van een statische omgeving.

Naar het kwantificeren van het effect van deze psychologische factoren op het ervaren thermisch comfort is echter nog slechts zeer beperkt onderzoek gedaan.

2.5 Comfortcriteria

Criteria die zijn ontwikkeld voor het beoordelen van het thermisch comfort van een ruimte zijn vooral gericht op de fysische factoren, ofwel binnen welke grenzen moet de luchttemperatuur, stralingstemperatuur, luchtsnelheid en relatieve luchtvochtigheid blijven om voor een grote groep mensen als comfortabel te worden ervaren. Deze criteria richten zich dus op het gemiddelde comfort voor een grote groep.

Binnen de comfortcriteria zijn twee belangrijke stromingen te onderscheiden:

1. De comfortcriteria gebaseerd op het Predicted Mean Vote (PMV) model van Fanger, dat uitgaat van de warmtebalans van het menselijk lichaam. Deze criteria vormen het uitgangspunt van diverse standaarden en richtlijnen, waarvan ISO 7730 (2005) en ASHRAE 55 (2017) de bekendste zijn. Het PMV model van Fanger is gebaseerd op grootschalige onderzoeken met proefpersonen in klimaatkamers onder constante omstandigheden (Fanger, 1970). De PMV wordt berekend op basis van zes parameters: metabolisme,

kleding, luchttemperatuur, gemiddelde stralingstemperatuur, lichtsnelheid en relatieve luchtvochtigheid. In de betreffende normen worden verschillende kwaliteitsklassen gehanteerd. Voor klasse A gebouwen (met een verwacht percentage ontevreden van maximaal 6%) schrijft ISO 7730 (2005) in de winter een operationele temperatuur tussen 21 en 23°C voor en in de zomer een operationele temperatuur tussen 23,5 en 25,5°C.

2. De adaptieve comfortcriteria gebaseerd op veldonderzoeken, waarbij het uitgangspunt is dat mensen in een gebouw zonder mechanische koeling een grotere bandbreedte aan temperaturen comfortabel vinden. Deze comfortcriteria zijn ook opgenomen in diverse standaarden en richtlijnen, zoals NEN-EN 15251 (2007), ASHRAE 55 (2017) en ISSO 74 (2014). De adaptieve comfortcriteria linken de acceptabele bandbreedte van de operationele binnentemperatuur aan de buitentemperatuur en gaan er vanuit dat bij warm weer in gebouwen zonder mechanische koeling en te openen ramen door adaptatie-effecten hogere binnentemperaturen acceptabel zijn dan je zou verwachten op basis van het PMV model. Adaptatie wordt hierbij gedefinieerd als 'the gradual diminution of the organism's response to repeated environmental stimulation, and can be both behavioral (clothing, windows, ventilators), physiological (acclimatization) as well as psychological (expectation)' (De Dear en Brager, 1998). Voor de wintersituatie en voor gebouwen met mechanische koeling is het adaptieve model echter gelijk aan het PMV model. De verschillende adaptieve comfortcriteria verschillen onderling enigszins omdat ze gebaseerd zijn op verschillende sets van veldexperimenten (Taleghani et al., 2013).

Bovengenoemde criteria zijn alleen gericht op het thermisch comfort. In het kader van gezondheid is het mogelijk wenselijk om niet altijd in een thermisch comfortabele omgeving te verblijven (Van Marken Lichtenbelt et al., 2017).

Naast bovengenoemde criteria voor algeheel thermisch comfort zijn er verschillende comfortcriteria opgesteld om lokaal thermisch discomfort te evalueren. Lokaal thermisch discomfort ontstaat wanneer een deel van het lichaam te sterk afkoelt of opwarmt terwijl de temperatuur in de ruimte op zich goed is. De belangrijkste aspecten voor lokaal thermisch discomfort zijn (ISO 7730, 2005):

- Verticale temperatuurgradiënt: voor een klasse A gebouw ($PD^1 < 3\%$) moet het temperatuurverschil tussen 1,1 en 0,1m boven de grond kleiner zijn dan 2°C;
- Stralingsasymmetrie: voor een klasse A gebouw ($PD^1 < 5\%$) moet de stralingsasymmetrie ten gevolge van een warm plafond kleiner zijn dan 5°C, ten gevolge van een koude wand kleiner dan 10°C, ten gevolge van een koud plafond kleiner dan 14°C en ten gevolge van een warme wand kleiner dan 23°C;

¹ PD staat voor 'percentage dissatisfied': het verwachte percentage ontevreden

- Vloertemperatuur: voor een klasse A gebouw ($PD^1 < 10\%$) moet de oppervlaktetemperatuur van de vloer tussen 19 en 29°C liggen;
- Tocht: voor een klasse A gebouw ($PD^1 < 10\%$) moet de draught rate kleiner zijn dan 10%. De draught rate wordt berekend op basis van de lokale gemiddelde lichtsnelheid, de lokale luchttemperatuur en lokale turbulentie-intensiteit (zie ISO 7730 (2005)).

Bovendien kan thermisch discomfort ontstaan als de operationele temperatuur te snel verandert of te veel fluctueert. Discomfort ten gevolge van temperatuurfluctuaties kan worden voorkomen als de piek-tot-piek variatie minder is dan 1°C (ISO 7730, 2005). Het discomfortrisico kan worden bepaald o.b.v. onderstaande formule (ISSO 74, 2014):

$$\Delta\theta^2 \times f < 4,6$$

Waarin:

$\Delta\theta$	verschil tussen maximum- en minimum(lucht)temperatuur	[K]
f	aantal temperatuurwisselingen per uur	[]

Uit onderzoek van Schellen et al. (2013) blijkt dat een temperatuurverandering van 2°C per uur nog acceptabel is.

Het is bij bovenstaande criteria t.a.v. veranderingen en fluctuaties in operationele temperatuur van belang dat de temperatuur altijd binnen het gedefinieerde comfortgebied blijft.

Gezien de inzichten die de laatste jaren zijn opgedaan over individuele verschillen in hoe het thermisch comfort wordt ervaren, kun je je afvragen of bovengenoemde comfortcriteria niet verder toegespitst zouden moeten worden op deze verschillen, bijv. door voor mannen en vrouwen andere criteria te hanteren. Het aantal onderzoeken dat de verschillen tussen groepen heeft trachten te kwantificeren is echter nog zeer beperkt. Daarnaast laten deze onderzoeken zien dat de verschillen in thermisch comfort binnen een groep vele malen groter zijn dan de verschillen tussen de groepen. De comfortcriteria aanpassen aan persoonskenmerken is daardoor op basis van de huidige stand van onderzoek niet mogelijk.

De comfortcriteria die binnen OfficeComfort worden gehanteerd worden beschreven in hoofdstuk 5.

3 Verfijnde meetmethodiek fysische beïnvloedingsfactoren

3.1 Inleiding

In de praktijk blijkt dat het gebouwbeheersysteem (GBS) in veel gevallen regelt op basis van een luchttemperatuursensor die geen representatief beeld geeft van het thermisch comfort op de werkplekken. De positie van de sensor (vaak aan een ruimtewand) is niet representatief voor de werkplek en toegepaste sensoren zijn, door de prijsdruk, vaak van beperkte kwaliteit. Hierdoor komen veelvuldig klachten voor, terwijl het GBS aangeeft dat de temperaturen in orde zijn. Het is duidelijk dat het gewenste thermisch comfort hierdoor niet, of niet op een energie effectieve wijze, aangeboden kan worden: het stuur ontbreekt.

Er zijn ook uitgebreidere methodes om comfort te meten, waarbij de gemiddelde stralingstemperatuur, luchtsnelheid en luchttemperatuur op verschillende posities (de zogenaamde meetboom) worden gemeten. Deze meetboom leent zich echter niet voor continue monitoring in praktijksituaties vanwege de hoge kosten en de kwetsbaarheid van met name de luchtsnelheidssensoren.

In paragraaf 2.2 is een overzicht gegeven van de fysische omgevingsfactoren die van invloed zijn op het ervaren thermisch comfort. In dit hoofdstuk wordt aangegeven welke van deze fysische factoren vanuit oogpunt van de boordeling van het thermisch comfort noodzakelijk zijn om te meten, waarbij vooral ook de praktische toepassing in het oog is gehouden.

3.2 Te meten fysische factoren

Voor de thermische comfortbeleving is de operatieve temperatuur (het gemiddelde tussen de luchttemperatuur en de gemiddelde stralingstemperatuur) de belangrijkste beïnvloedingsfactor, welke ook wordt gebruikt in de adaptieve temperatuurgrenswaardenmethodiek die we als comfortcriterium hanteren (zie hoofdstuk 5). Naast de luchttemperatuur is het daarom van belang een goede inschatting te kunnen maken van de gemiddelde stralingstemperatuur (Halawa et al., 2014). Dit kan op basis van meting met een zwarte bol (ISO 7726, 1998). De gemiddelde stralingstemperatuur kan echter ook worden ingeschat op basis van de oppervlaktetemperatuur van de omringende vlakken en zichtfactoren (ISO 7726, 1998). Een andere mogelijkheid is om de temperatuur in de ruimte te meten met luchttemperatuursensoren die niet zijn afgeschermd voor straling. Op deze manier wordt door de luchttemperatuursensoren ook een deel van de straling mee gemeten, waardoor een betere indicatie wordt verkregen van de operatieve temperatuur dan wanneer alleen de luchttemperatuur wordt gemeten (Kooi et al., 2018).

Aangezien een zwarte bol kostbaar is en veel ruimte in beslag neemt, is het niet praktisch haalbaar om de gemiddelde stralingstemperatuur hiermee te meten. Binnen OfficeComfort is daarom besloten om de temperatuur te meten met luchttemperatuursensoren die niet zijn afgeschermd voor straling of, indien dit niet mogelijk blijkt, om de gemiddelde stralingstemperatuur in te schatten op basis van de oppervlaktetemperatuur van de omringende vlakken en zichtfactoren (ISO 7726, 1998). De kans op stralingsasymmetrie zal worden ingeschat op basis van gebouwenkenmerken.

De luchtsnelheid is een bepalende factor voor het ervaren thermisch comfort, met name in geval van tocht. De luchtsnelheid zal echter erg verschillen per positie in de ruimte, bijvoorbeeld ten gevolge van luchtstroming bij ventilatieroosters. Aangezien de luchtsnelheid erg zal variëren per positie en de meetapparatuur om luchtsnelheid te meten bovendien erg kostbaar is, is het niet mogelijk om de luchtsnelheid goed in kaart te brengen door middel van continue meting. Binnen OfficeComfort is daarom besloten om een inschatting te maken van het risico op discomfort ten gevolge van tocht op basis van gebouwenkenmerken.

De relatieve luchtvochtigheid (RV) is vooral van belang voor het ervaren thermisch comfort bij hoge temperaturen en hoge activiteitsniveaus. Binnen OfficeComfort is daarom besloten om de relatieve luchtvochtigheid niet mee te nemen in de meet set-up.

Binnen OfficeComfort is besloten de vloertemperatuur niet mee te nemen in de meet set-up omdat wordt verwacht dat bij beter geïsoleerde gebouwen de vloertemperatuur binnen gebruikstijden altijd binnen de gestelde comfortgrenzen blijft.

3.3 Meet set-up

Op basis van de overwegingen die in paragraaf 3.2 zijn gegeven, is de meet set-up als volgt gedefinieerd (zie bijlage A voor de uitgebreide specificaties van het sensorsysteem):

- Luchttemperatuur (zonder afscherming voor straling) meten met een meetnauwkeurigheid van bij voorkeur $0,2^{\circ}\text{C}$ en een sample tijd van 5 minuten op 3 hoogtes:
 - o Ter hoogte van de enkels: 0,1m boven de vloer
 - o Ter hoogte van de romp: 0,6 m boven de vloer bij een zit-werkplek en 1,1 m boven de vloer bij een sta-werkplek
 - o Ter hoogte van het hoofd: 1,1 m boven de vloer een zit-werkplek en 1,7 m boven de vloer bij een sta-werkplek
- De minimale configuratie bestaat uit een meetunit op ruimteniveau, en twee meetunits op werkplekniveau. De gewenste configuratie is afhankelijk van de eigenschappen van de ruimte waarin het thermisch comfort gemonitord wordt en zal dus per situatie moeten worden bekeken. Niet alleen het vloeroppervlak van de ruimte is van invloed op het benodigde aantal meetposities, maar ook de aanwezigheid van obstakels (Kooi et al., 2018).

Voor het veldexperiment is vanuit praktische overwegingen gekozen voor commerciële sensoren. Uiteindelijk is gekozen voor de klimaatsensoren van Cloudgarden. Deze sensor meet de luchttemperatuur met een nauwkeurigheid van $0,2^{\circ}\text{C}$. De temperatuursensor is volledig afgeschermd voor straling, waardoor alleen de luchttemperatuur wordt gemeten. In het veldexperiment zal de gemiddelde stralingstemperatuur daarom worden ingeschat op basis van een inschatting van de oppervlaktetemperatuur van de omringende vlakken. Naast de luchttemperatuur meet de geselecteerde sensor ook de relatieve luchtvochtigheid, CO_2 en VOC.

4 Methodiek registratie subjectieve comfortbeleving

4.1 Methodiek registratie subjectieve comfortbeleving

In veel kantoorgebouwen hebben medewerkers alleen de mogelijkheid om hun onvrede over het thermisch comfort via een klachtenregistratiesysteem te melden. Deze wijze van registratie van subjectieve comfortbeleving leidt er toe dat alleen de extremere klachten in kaart worden gebracht en worden verholpen. Er wordt daarbij alleen reactief gehandeld: er wordt pas actie ondernomen om het binnenklimaat te verbeteren als er klachten zijn. Om een goed beeld te krijgen van het ervaren thermisch comfort in een gebouw en discomfortrisico's tijdig te detecteren, is het echter beter periodiek (bijv. 2 tot 4 keer per jaar) een vragenlijst af te nemen onder de medewerkers. Op deze manier wordt een totaalbeeld verkregen van het ervaren thermisch comfort, waarbij ook de mildere vormen van discomfort aan het licht komen.

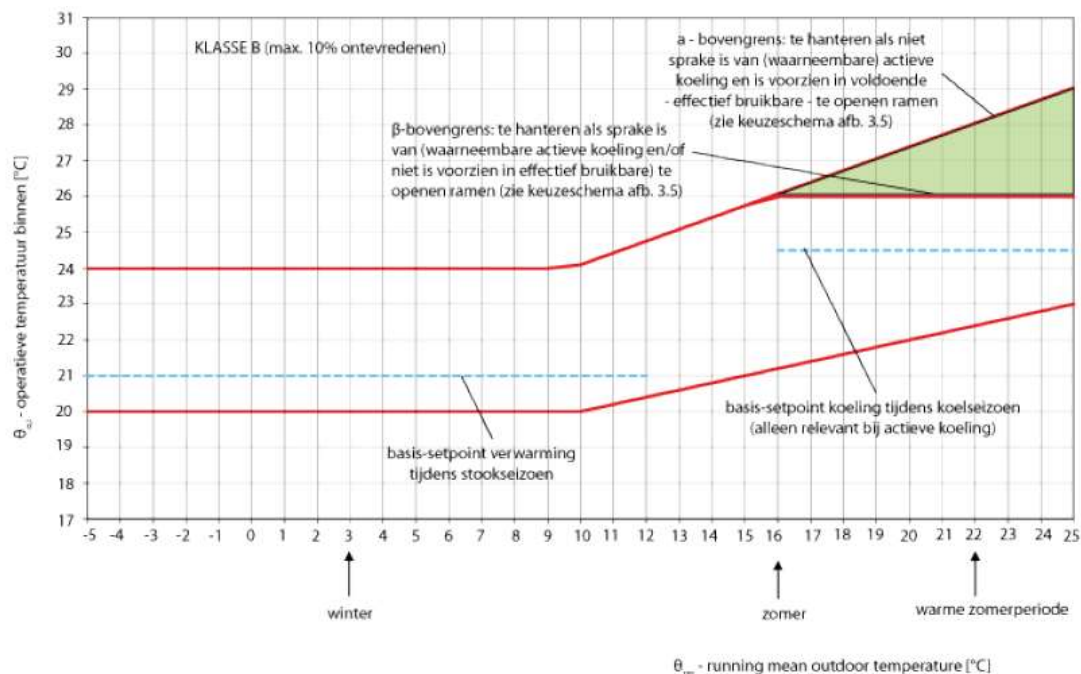
Wanneer een periodieke vragenlijst wordt afgenomen is het van belang dat naar het ervaren thermisch comfort van de afgelopen periode (bijv. de afgelopen maand) wordt gevraagd. Alleen vragen naar het ervaren comfort op dit moment is ontoereikend om een algemeen beeld te verkrijgen. Discomfort treedt namelijk vaak op een specifiek moment op, bijvoorbeeld op de maandagochtend door trage opwarming na het weekend. Hierbij is het tevens van belang dat goed in kaart wordt gebracht op welk tijdstip en op welke locatie eventueel discomfort optreedt. Dit laatste geldt ook voor een klachtenregistratiesysteem: tijdstip en locatie van optreden van de klacht, zijn noodzakelijk om de oorzaak van de klacht te kunnen achterhalen.

4.2 Vragenlijst subjectieve comfortbeleving

Binnen dit project is een vragenlijst opgesteld die gebruikt kan worden voor het periodiek in kaart brengen van de subjectieve comfortbeleving, zie annex B. Deze vragenlijst is ook ingezet bij het gebruikersonderzoek bij ING (zie D3.1).

5 Verfijnde methodiek inschatting thermisch comfort

Op basis van de literatuur blijkt dat de adaptieve comfortmodellen het beste aansluiten bij het ervaren thermisch comfort in de praktijk. Voor OfficeComfort is besloten om de adaptieve temperatuur grenswaarden (ATG) methodiek uit ISO 74 (2014) te hanteren omdat hierin de eisen voor de zomer- en winterperiode en gebouwen met en zonder mechanische koeling zijn geïntegreerd. Deze ATG-eisen sluiten aan bij de eisen die in ISO 7730 (2005) en NEN-EN 15251 (2007) worden gesteld. Voor OfficeComfort is hierbij uitgegaan van comfortklasse B (een verwacht percentage ontevreden van maximaal 10%). Voor gebouwen met mechanische koeling en gebouwen zonder mechanische koeling zijn de comfortgrenzen weergegeven in onderstaande figuur. De comfortgrenzen worden hierbij gesteld aan de operationele temperatuur (het gemiddelde tussen de luchttemperatuur en de gemiddelde stralingstemperatuur). Dit houdt in dat voor een goede evaluatie in de praktijk het van belang is een goede indicatie te hebben van de gemiddelde stralingstemperatuur (zie ook hoofdstuk 3 m.b.t. de verfijnde meetmethodiek fysische beïnvloedingsfactoren). Binnen OfficeComfort wordt de temperatuur gemeten met luchttemperatuursensoren die niet zijn afgeschermd voor straling, waardoor een direct een indicatie van de operationele temperatuur wordt verkregen. Indien dit niet mogelijk blijkt, wordt de gemiddelde stralingstemperatuur ingeschat op basis van een inschatting van de oppervlaktetemperatuur van de omringende vlakken en zichtfactoren (ISO 7726, 1998).



Figuur 2 Klasse B-eisen voor de operationele temperatuur binnen (met een verwacht percentage ontevreden van - afgerond - maximaal 10%), in relatie tot de running mean outdoor temperature (ISSO 74, 2014).

Voor OfficeComfort worden daarnaast enkele criteria voor lokaal comfort en dynamiek gesteld (gebaseerd op ISO 7730, 2005) die kunnen worden getoetst aan de hand van fysische metingen (zie hoofdstuk 3), namelijk:

- Verticale temperatuurgradiënt: het temperatuurverschil tussen 1,1 en 0,1m boven de grond moet kleiner zijn dan 2°C;
- Temperatuurfluctuatie: de fluctuatie in temperatuur moet minder zijn dan 1°C per uur².

Daarnaast wordt de kans dat enkele lokale comfortcriteria worden overschreden ingeschat aan de hand van gebouwkenmerken (deels gebaseerd op Jacobs et al., 2017):

- Kans op discomfort ten gevolge van stralingsasymmetrie is aanwezig in de volgende gevallen:
 - o Aanwezigheid van enkel glas
 - o Aanwezigheid van grote glasoppervlakken
 - o Aanwezigheid van verwarming via een stralingsplafond
- Kans op discomfort ten gevolge van tocht is aanwezig in de volgende gevallen:
 - o Aanwezigheid van enkel glas
 - o Aanwezigheid van grote glasoppervlakken
 - o Geen verwarmingselement onder de ramen
 - o Aanwezigheid van topkoeling
 - o Aanwezigheid luchttoevoerroosters mechanische ventilatie dichtbij medewerkers
 - o Aanwezigheid gevelroosters natuurlijke ventilatie

Indien op basis van de gebouwkenmerken blijkt dat er een risico is dat discomfort ontstaat ten gevolge van stralingsasymmetrie of tocht, dan wordt aangeraden om een expert in te schakelen en eventueel aanvullende (momentane) metingen te doen.

Binnen OfficeComfort is besloten voor iedereen dezelfde comfortcriteria te hanteren, omdat er nog onvoldoende onderbouwing is voor aanpassing van de comfortcriteria aan persoonskenmerken en de verschillen in thermisch comfort binnen een groep vele malen groter zijn dan de verschillen tussen groepen. Wel zal in het praktijkonderzoek worden gekeken of verschillen in thermische comfortbeleving tussen groepen optreden, bijvoorbeeld verschillen tussen mannen en vrouwen of ouderen en jongeren.

² Volgens de literatuur gelden er twee comfortcriteria die zijn gerelateerd aan temperatuurfluctuaties (zie paragraaf 2.5): de piek tot piek variatie moet minder zijn dan 1°C en de temperatuurvariatie moet minder zijn dan 2°C per uur. Deze criteria zijn voor OfficeComfort samen genomen tot één criterium: de fluctuatie moet minder zijn dan 1°C per uur.

6 Verbetering methodiek o.b.v. evaluatie in de praktijk

Uit het veldexperiment (D3.1) is gebleken dat de verfijnde methode tot een gedetailleerd beeld heeft geleid van het ervaren comfort. Het ervaren discomfort bleek in de testperiode gering te zijn en beperkte zich tot korte perioden met een luchttemperatuur onder de 20°C op de ochtend na een koud weekend. Wanneer een inschatting wordt gemaakt van de operationele temperatuur (D2.1) dan zien we dat de operationele temperatuur na een koud weekend op maandagochtend achterloopt op de luchttemperatuur omdat het gebouw in zijn geheel nog niet is opgewarmd na het koude weekend. Dit duidt aan dat er koude klachten kunnen zijn na het weekend en/of feestdagen omdat de gebouwmassa nog niet op temperatuur is. Rekening houden met het effect dat de gebouwmassa heeft op de operationele temperatuur is voor het inschatten van mogelijke discomfortrisico's daarom zeker van belang.

Omdat een traag opwarmende gebouwmassa een flink effect kan hebben op de operationele temperatuur en met commerciële sensoren meestal alleen de luchttemperatuur wordt gemeten, wordt meting van de oppervlaktetemperatuur van constructies met een grote thermische massa toegevoegd aan de meet set-up. Op basis van de oppervlaktetemperatuur van de gebouwmassa in combinatie met de luchttemperaturen kan dan een inschatting worden gemaakt van de operationele temperatuur op verschillende posities in de ruimte (zie de methodiek in D2.1).

Er zijn in het veldexperiment geen grote fluctuaties over de hoogte of fluctuaties in de tijd gevonden die mogelijk kunnen leiden tot discomfort. Ook zijn er geen duidelijke warme of koude plekken op de verdieping te onderscheiden, buiten de warme vergaderzaal die buiten het onderzoek viel.

Deze objectieve metingen worden bevestigd door de subjectieve metingen: de medewerkers zijn overwegend tevreden over het klimaat op hun verdieping in de testperiode. Het enige dat er gevonden is, is een lichte trend dat een deel van de werknemers het soms aan de koude kant vindt, vooral in de ochtend. Dat is in lijn met wat de verfijnde methode vindt, namelijk dat de temperatuur na een koud weekend in de vroege ochtend wat lager is dan 20°C. Het gebrek aan klachten is verder ook in overeenstemming met de bevindingen van de verfijnde methode.

Wat de combinatie van verfijnde methode en subjectieve metingen ook laat zien is dat werknemers die zeggen dat ze het wat kouder hebben gemiddeld genomen ook op plekken zitten waar op dat moment een wat lagere temperatuur wordt gemeten, en andersom. Bovenop de bekende individuele verschillen en verschillen door kleding en activiteitsniveau, lijkt het dus zo te zijn dat mensen die klachten hebben daar ook daadwerkelijk reden toe kunnen hebben door kleine lokale verschillen.

Doordat het ervaren discomfort op de testverdieping tijdens de testperiode gering was, is het slechts beperkt mogelijk om uitspraken te doen over de

geschiktheid van de verfijnde methode om discomfortrisico's in te schatten. Binnen die beperking werkt de verfijnde methode goed en kan het ervaren comfort goed op objectieve wijze worden bepaald. Aangeraden wordt de verfijnde methode te evalueren op een locatie waar meer klachten zijn, bijvoorbeeld op de huidige verdieping in een warme zomerperiode.

Uit het veldexperiment blijkt dat vrouwen de temperatuur gemiddeld als iets kouder ervaren dan mannen (D3.1). De verschillen zijn echter klein en niet significant.

7 Conclusies en discussie

Het doel van werkpakket 1 is om tot een verfijnde methodiek te komen voor de bepaling van thermisch comfort om zo tijdig discomfortrisico's te kunnen signaleren.

De verfijnde methodiek bestaat uit een meetmethodiek voor het meten van de meest cruciale fysische beïnvloedingsfactoren en een evaluatiemethodiek om te bepalen in hoeverre er discomfortrisico's zijn. Daarnaast omvat de verfijnde methodiek een vragenlijst voor periodieke registratie van de subjectieve comfortbeleving. De meet set-up bestaat uit een meting van de luchttemperatuur op 3 hoogtes (0,1, 0,6 en 1,1m bij een zit-werkplek) en meting van de oppervlaktetemperatuur van de constructies met een grote thermische massa. Het aantal posities waarop deze metingen worden uitgevoerd is afhankelijk van de eigenschappen van de ruimte waarin het thermisch comfort gemonitord wordt en zal dus per situatie bekeken moeten worden. Op basis van de gemeten luchttemperaturen en oppervlaktetemperaturen wordt een inschatting gemaakt van de operationele temperatuur op de verschillende posities in de ruimte. Comfortrisico's treden mogelijk op als:

- De operationele temperatuur buiten de grenzen van comfortklasse B van de adaptieve temperatuurgrenswaarden methodiek van ISO 74 (2014) valt;
- Het temperatuurverschil tussen 1,1 en 0,1m boven de grond groter is dan 2°C;
- De fluctuatie in temperatuur groter is dan 1°C per uur.

Daarnaast wordt aan de hand van gebouwkenmerken een inschatting gemaakt van de kans dat discomfort ontstaat door stralingsasymmetrie en tocht (zie hoofdstuk 5).

Uit het veldexperiment (WP3) is gebleken dat de verfijnde methode tot een gedetailleerd beeld heeft geleid van het ervaren comfort. Het ervaren discomfort bleek in de testperiode echter gering te zijn. Hierdoor is het slechts beperkt mogelijk om uitspraken te doen over de geschiktheid van de verfijnde methode om discomfortrisico's in te schatten. Binnen die beperking, werkt de verfijnde methode goed en kan het ervaren comfort goed op objectieve wijze worden bepaald. Aangeraden wordt de verfijnde methode te evalueren op een locatie waar meer klachten zijn.

Binnen de verfijnde methodiek wordt geen onderscheid gemaakt naar persoonskenmerken (bijvoorbeeld mannen/vrouwen), omdat er nog onvoldoende onderbouwing is voor aanpassing van de comfortcriteria aan persoonskenmerken en de verschillen in thermisch comfort binnen een groep vele malen groter zijn dan de verschillen tussen groepen. In het veldexperiment was het slechts beperkt mogelijk om het ervaren thermisch comfort te evalueren naar verschillen in persoonskenmerken. Alleen verschillen tussen mannen en vrouwen zijn bekeken: vrouwen bleken de temperatuur gemiddeld als iets kouder te ervaren dan mannen. De verschillen zijn echter klein en niet significant. Hoewel het op basis van de huidige stand van onderzoek niet mogelijk is onderscheid te maken tussen persoonskenmerken bij de evaluatie

van het thermisch comfort, is het mogelijk wel een route om het ervaren thermisch comfort beter in te kunnen schatten. Om tot een dergelijke methodiek te komen is echter grootschalig onderzoek nodig.

8 Referenties

ASHRAE 55, Thermal environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE Standard 55-2017 American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, Georgia, 2017.

Byrne, N.M., Hills, A.P., Hunter, G.R., Weinsier, R.L., Schutz, Y. Metabolic equivalent: one size does not fit all. J. Appl. Physiol. 99 (3), pp.1112-1119, 2005.

Carlucci, S., Baia, L., de Dear, R., Yang, L. Review of adaptive thermal comfort models in built environmental regulatory documents. Building and Environment 137, pp. 73-89, 2018.

Clark, R.P., Edholm, O.G. Man and his thermal environment. Edward Arnold (Publishers) Ltd, London, 1985.

De Dear, R., Brager, G. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. ASHRAE Transactions, Vol. 104, Part 1, pp. 145-167, 1998.

Fanger, P.O. Thermal Comfort. Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.

Halawa, E., van Hoof, J., Soebarto, V. The impacts of the thermal radiation field on thermal comfort, energy consumption and control - A critical overview. Renewable Sustainable Energy Reviews 37, pp. 907-918, 2014.

ISO 7726, Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities; International Standards Organization, Geneva; 1998.

ISO 7730, Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria; International Standards Organization, Geneva; 2005.

ISSO 74, Thermische behaaglijkheid, 2014.

Jacobs, P., Cornelissen, E., de Kluizenaar, Y. Protocol quickscan binnenmilieu kantoren. Eindrapportage TNO technologiecluster verbeteren binnenklimaat kantoren. Ref. 20170105-03. 2017.

Karjalainen, S. Thermal comfort and gender: a literature review. Indoor Air 22, pp. 96-109, 2012.

Kim, J., de Dear, R., Cândido, C., Zhang, H., Arens, E. Gender differences in office occupant perception of indoor environmental quality (IEQ). Building and Environment 70, pp. 245-256, 2013.

Kingma, B., Frijns, A., Van Marken Lichtenbelt, W. The thermoneutral zone: Implications for metabolic studies. *Frontiers in Bioscience E4* (5), pp. 1975–1985, 2012.

Kooi, L., Mishra, A., Loomans, M., Hensen, J. Is GBS data voldoende voor lange-termijn monitoring van het binnenklimaat? *TVVL magazine* 02-2018, pp. 15-19, 2018.

NEN-EN 15251. Binnenmilieu gerelateerde input parameters voor ontwerp en beoordeling van energieprestatie van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek, 2007.

Nikopoulou, M., Steemers, K. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings* 35, 95–101, 2003.

Rupp, R., Vásquez, N., Lamberts, R. A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings* 105, pp. 178–205, 2015.

Rupp, R., Kim, J., De Dear, R., Ghisi, E. Associations of occupant demographics, thermal history and obesity variables with their thermal comfort in air-conditioned and mixed-mode ventilation office buildings. *Building and Environment* 125, pp. 1-9, 2018.

Schellen, L., van Marken Lichtenbelt, W., Loomans, M., Toftum, J., de Wit, M. Differences between young adults and elderly in thermal comfort, productivity, and thermal physiology in response to a moderate temperature drift and a steady-state condition, *Indoor Air* 20, pp. 273–283, 2010.

Schellen, L., Kingma, B., Loomans M., de Wit, M., van Marken Lichtenbelt, W. Thermisch comfort onder niet-uniforme omgevingscondities. *Bouwfysica* 2, 2013.

Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S., van den Dobbelsteen, A. A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26, pp. 201–215. 2013.

Van Marken Lichtenbelt, W., Hanssen, M., Pallubinsky, H., Kingma, B., Schellen, L. Healthy excursions outside the thermal comfort zone. *Building Research & Information*, Vol. 45, No. 7, pp. 819–82, 2017.

Wang, Z., De Dear, R., Luo, M., Lin, B., He, Y., Ghahramani, A., Zhu, Y. Individual difference in thermal comfort - A literature review. *Building and Environment* 138, pp. 181-193, 2018.