

## MASTER

**Natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem  
de invloed van gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities op thermisch comfort en  
thermofysiologische responsies**

van Harten, M.

*Award date:*  
2011

[Link to publication](#)

### **Disclaimer**

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

ARR  
2011  
BWK

4795

## NATUURLIJKE VENTILATIETOEVOER IN COMBINATIE MET EEN LAAG TEMPERATUUR VERWARMINGSSYSTEEM

De invloed van gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities op  
thermisch comfort en thermofysiologische responsies

Marjon van Harten

TU/e

Technische Universiteit  
Eindhoven  
University of Technology

# NATUURLIJKE VENTILATIETOEVOER IN COMBINATIE MET EEN LAAG TEMPERATUUR VERWARMINGSSYSTEEM

DE INVLOED VAN GECOMBINEERDE NIET-UNIFORME OMGEVINGSCONDITIES OP  
THERMISCH COMFORT EN THERMOFYSIOLOGISCHE RESPONSIES

M. (Marjon) van Harten  
Masterproject 4  
Studentnummer: 0635439

## COMMISSIE

Prof. dr. ir. J.L.M. Hensen (vz)

Dr. ir. M.G.L.C. Loomans

Dr. W.D. van Marken Lichtenbelt

Ir. L. Schellen

*Technische Universiteit Eindhoven*

*Technische Universiteit Eindhoven*

*Universiteit Maastricht*

*Technische Universiteit Eindhoven*

Technische Universiteit Eindhoven  
Faculteit Bouwkunde  
Unit Building Physics and Systems  
Mastertrack Physics of the Built Environment

Mei 2011



dr. ir. M.G.L.C. Loomans

ioo  
prof. dr. ir. J.L.M. Hensen



## SUMMARY

Energy savings in buildings will become increasingly important. Higher thermal insulation levels and the use of a low temperature heating system cause the ventilation system to have more effects on thermal comfort. Natural supply ventilation combined with a low temperature heating system is used as an alternative for a balanced ventilation system but also as a cooling system in Low energy-houses to compensate the internal heat load.

In situations with natural ventilation and low temperature heating, draught may result from badly mixed indoor air, caused by weak convective heat fluxes near the ventilation inlet. The use of a floor heating system may lead to a combined non-uniform environment, which is caused by draught and radiant temperature asymmetry.

In non-uniform environments, thermal comfort is more dependent of individual body parts than of the body as a whole. For situations with natural supply ventilation NEN-EN-ISO 7730 may predict an incorrect thermal sensation by PMV. The percentage dissatisfied (PD) of people that are dissatisfied by draught and radiant temperature asymmetry can only be predicted for singular non-uniform environments by NEN-EN-ISO 7730. It cannot predict it for combined non uniform environments. Therefore, research has been done to predict thermal comfort in combined and singular non-uniform environments when using several inlet temperatures.

In a thermo physiological test room, experiments with subjects have been conducted to give more insight into relation between thermal comfort, thermal physiological responses and environmental conditions.

In these tests the lowest possible supply temperature was approximately 16.8°C, with an inlet velocity of 1.2 m/s, an average radiant temperature of 21.5°C and a PMV value of approximately 0.

The results of the environmental conditions (air temperature, air velocity and radiant temperature) combined with the thermo physiological results and the thermal comfort votes are used to calibrate a CFD-model, a thermo physiological model (ThermoSEM) and a prediction model for (local) thermal comfort (Comfort Zones Diagram). The link between these models is used to predict thermal comfort in situations with a supply temperature of 5 and -10°C. These thermal comfort will be compared to the thermal comfort prediction with PMV.

The experiments show that overall thermal sensation is predicted mainly by distal thermal sensation. Distal skin temperatures have also a significant relation with the overall thermal sensation.

Draught is an explanatory variable for both overall thermal sensation and overall thermal comfort. No significant differences have been found between PMV and overall thermal sensation responses and neither between singular and combined non-uniform environmental conditions.

A combination of CFD, ThermoSEM and Comfort Zones Diagram predict an overall thermal sensation between neutral and 'cold but comfortable' for all inlet temperatures  $\leq 5^\circ\text{C}$ . Thermal sensation of the feet are 'cold but comfortable' because of density differences between the low inlet temperature and the higher indoor air temperature, that resulted in higher air velocities ( $\pm 0.3$  m/s) and lower air temperatures (16.8 - 18.8°C) near the floor.

According to Nillsons theory of the Comfort Zones Diagram, in this situation the overall thermal sensation combined with the local thermal sensation of the feet results in an uncomfortable situation although the PMV was approximately zero.

In more extreme non-uniform environments, e.g. caused by an inlet temperature  $\leq 5^{\circ}\text{C}$ , it is recommended to use a local thermal comfort prediction model. For less extreme non-uniform environments, such as caused by an inlet temperature  $\geq 16.8^{\circ}\text{C}$ , thermal comfort could be predicted with PMV.

## SAMENVATTING

Het verminderen van het energie verbruik in gebouwen wordt steeds belangrijker. Door het beter isoleren van gebouwen en het toepassen van laag temperatuur verwarmingssystemen wordt de invloed van ventilatiesystemen op het thermisch comfort groter.

Natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem (NTV+LTV) kan worden toegepast als een alternatief voor een gebalanceerd ventilatiesysteem of voor het wegnemen van een hoge interne warmtelast in goed geïsoleerde gebouwen. NTV+LTV kan (lokaal) thermisch discomfort veroorzaken doordat de warmtestroomdichtheid van een laag temperatuur verwarmingssysteem over het algemeen te zwak is om een koudeval van ventilatielucht te voorkomen. Bij het toepassen van bijvoorbeeld een vloerverwarmingssysteem ontstaat er een situatie waarbij gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities optreden (combinatie van tocht met stralingstemperatuurasymmetrieën).

Met de Predicted Mean Vote (PMV) (NEN-EN-ISO 7730) kan een goede voorspelling worden gedaan van de thermische sensatie bij natuurlijke ventilatie. Het percentage ontevreden (PD) (NEN-EN-ISO 7730) kan alleen als gevolg van enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities voorspeld worden.

In dit onderzoek is onderzocht hoe het thermisch comfort bij verschillende inblaastemperaturen in situaties met gecombineerde en enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities het beste voorspeld kan worden. Hiervoor is eerst een proefpersoononderzoek uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in de relatie tussen thermisch comfort, thermofysiologische responsies en omgevingscondities. Uitgangspunt was een situatie met  $PMV=0$  veroorzaakt door de minimaal mogelijke inblaastemperatuur ( $\geq 16.8^{\circ}\text{C}$ ) bij een inblaassnelheid van 1.2 m/s en een gemiddelde stralingstemperatuur van  $21.5^{\circ}\text{C}$ . Met de optredende omgevingscondities (luchttemperatuur en lichtsnelheid) en de responsies uit het proefpersoononderzoek wordt een koppeling van een CFD-model, een thermofysiologisch model (ThermoSEM) en een (lokaal) thermisch comfort voorspellingsmethode (Comfort Zones Diagram) gevalideerd. De thermische sensatie beoordeling van het proefpersoononderzoek (AMV) wordt vergeleken met deze koppeling en met de PMV. Daarna wordt er een variantenstudie uitgevoerd voor situaties met inblaastemperaturen van 5 en  $-10^{\circ}\text{C}$ . Voor deze situaties wordt met beide methoden het thermisch comfort voorspeld.

Het proefpersoononderzoek laat zien dat de algehele thermische sensatie het meest verklaard kan worden door de distale thermische sensatie en de distale huidtemperaturen. Tocht is een significante verklarende parameter gebleken voor zowel het algehele thermisch comfort als de algehele thermische sensatie.

Er zijn onder de proefpersooncondities geen significante verschillen gemeten tussen de PMV en de beoordeling van de algehele thermische sensatie. Daarnaast is er geen significant verschil gemeten tussen de algehele thermische sensatie bij een situatie met enkelvoudige en gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities.

De koppeling van CFD, ThermoSEM en Comfort Zones Diagram voorspelt vanaf een inblaastemperatuur van  $5^{\circ}\text{C}$  een algehele thermische sensatie tussen thermisch neutraal en 'koud maar comfortabel'. De thermische sensatie van de voeten ligt volledig in het 'koud maar comfortabel' gebied. Als gevolg van dichtheidsverschillen tussen de lage inblaastemperatuur en hoge ruimteluchttemperatuur ontstaan er namelijk op vloerniveau een hogere lichtsnelheid ( $\pm 0.3$  m/s) en lagere luchttemperatuur ( $16.8 - 18.8^{\circ}\text{C}$ ).

Volgens de theorie achter Comfort Zones Diagram is een situatie oncomfortabel wanneer de algehele thermische sensatie neutraal is en enkele lokale lichaamsdelen bijvoorbeeld in het 'koud maar comfortabel'

gebied liggen. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het lokaal discomfort zorgt voor een oncomfortabele situatie, terwijl de PMV een waarde voorspelt dicht bij neutraal.

Uit het proefpersoononderzoek en de variantenstudie kan geconcludeerd worden dat het voorspellen van het thermisch comfort in 'extremere' niet-uniforme condities, zoals bij een inblaastemperaturen kleiner of gelijk aan 5°C, het thermisch comfort beter voorspeld kan worden aan de hand van lokale fysische condities en een lokaal thermisch comfort voorspellingsmethode. Voor minder extreme niet-uniforme omgevingscondities, zoals bij een inblaastemperatuur vanaf 16.8°C kan het thermische comfort voorspeld worden door de PMV.



## VOORWOORD

Voor u ligt het rapport van mijn afstudeerproject van de mastertrack 'Physics of the Built Environment' van de masteropleiding 'Architecture, Building and Planning' aan de Technische Universiteit Eindhoven.

Tijdens mijn studie raakte ik steeds meer geïnteresseerd in de relatie tussen gebruiker en fysische omgeving. Zo is de mens uiteindelijk diegene die een gebouw niet alleen mooi of praktisch moet vinden, maar moet er ook in gezond en comfortabel kunnen leven.

Het project is voor mij een grote uitdaging geweest, waarbij ik veel nieuwe kennis heb opgedaan en nieuwe vaardigheden heb geleerd. Een proefpersoononderzoek, CFD-simulaties van het binnenklimaat, statistische analyses en het gebruik van verschillende numerieke modellen kwamen allemaal aan bod.

Voor hulp en assistentie tijdens de uitvoering van dit project wil ik een aantal personen bedanken: Allereerst de proefpersonen die tijd voor mij hebben vrij gemaakt en het KENWIB project voor het ter beschikking stellen van de proefpersoonvergoedingen. Daarnaast wil ik ir. K.C.H.J. Smolders bedanken voor haar hulp bij de statistische analyses. Ook wil ik B. Kingma MSc bedanken voor zijn hulp en aanpassingen van ThermoSEM. De medewerkers van het BPS-lab wil ik bedanken voor hun hulp bij het opbouwen van de meetopstelling. Graag wil ik ook mijn begeleiders bedanken voor de tijd die ze voor mij hebben vrijgemaakt: prof. dr. ir. J.L.M. Hensen, dr. ir. M.G.L.C. Loomans, dr. W.D. van Marken Lichtenbelt en ir. L. Schellen.

Marjon van Harten

Mei 2011



# INHOUDSOPGAVE

<b>SUMMARY .....</b>	<b>III</b>
<b>SAMENVATTING .....</b>	<b>V</b>
<b>VOORWOORD .....</b>	<b>VII</b>
<b>NOMENCLATUUR.....</b>	<b>XI</b>
<b>1. INLEIDING .....</b>	<b>1</b>
1.1. ACHTERGROND	1
1.2. DOELSTELLING	2
1.3. ONDERZOEKSVRAGEN	3
1.4. MAATSCHAPPELIJKE RELEVANTIE	3
1.5. WETENSCHAPPELIJKE RELEVANTIE	3
1.6. METHODE	4
1.7. INHOUD VERSLAG	4
<b>2. PROEFPERSONONDERZOEK ONDER LABORATORIUMCONDITIES .....</b>	<b>5</b>
2.1. METHODE VOOR HET METEN EN BEOORDELEN VAN THERMISCH COMFORT EN THERMOFYSIOLOGISCHE RESPONSIES	5
2.2. RESULTATEN VAN HET PROEFPERSONENONDEZOEK	10
2.3. DISCUSSIE	18
2.4. CONCLUSIE	21
<b>3. CFD: KALIBRATIE EN VARIANTENSTUDIE .....</b>	<b>23</b>
3.1. METHODE VOOR DE KALIBRATIEMETINGEN	23
3.2. METHODE VOOR CFD-SIMULATIES	25
3.3. KALIBRATIERESULTATEN	29
3.4. RESULTATEN VARIANTENSTUDIE	31
3.5. DISCUSSIE	33
3.6. CONCLUSIE	35

<b>4. BEOORDELEN VAN THERMISCH COMFORT MET THERMOSEM EN COMFORT ZONES DIAGRAM .....</b>	<b>37</b>
4.1. METHODEN	37
4.2. RESULTATEN	41
4.3. DISCUSSIE	45
4.4. CONCLUSIE	47
<b>5. DISCUSSIE .....</b>	<b>49</b>
5.1. RELATIE THERMOFYSIOLOGISCHE RESPONIES, THERMISCH COMFORT EN OMGEVINGSCONDITIES	49
5.2. INVLOED VAN GECOMBINEERDE NIET-UNIFORME OMGEVINGSCONDITIES	49
5.4. VOORSPELLEN THERMISCH COMFORT	50
<b>6. CONCLUSIE .....</b>	<b>53</b>
<b>7. AANBEVELINGEN .....</b>	<b>55</b>
7.1. VOORSPELLEN VAN THERMISCHE SENSATIE BIJ NATUURLIJKE VENTILATIETOEVOER IN COMBINATIE MET EEN LAAG TEMPERATUUR VERWARMINGSYSTEEM	55
7.2. AANBEVELINGEN VOOR DE UITVOERING VAN HET ONDERZOEK	55
7.3. AANBEVELINGEN VOOR VERVOLGONDERZOEK	56
<b>BRONVERMELDING .....</b>	<b>57</b>
<b>BIJLAGE 1 THERMOFYSIOLOGISCHE ONDERZOEKSKAMER .....</b>	<b>.....</b>
<b>BIJLAGE 2 FYSISCHE EN THERMOFYSIOLOGISCHE SENSOREN .....</b>	<b>.....</b>
<b>BIJLAGE 3 VRAGENLIJST .....</b>	<b>.....</b>
<b>BIJLAGE 4 HYPOTHESES .....</b>	<b>.....</b>
<b>BIJLAGE 5 OMGEVINGSCONDITIES PROEFPERSONEN ONDERZOEK .....</b>	<b>.....</b>
<b>BIJLAGE 6 KLEDINGWEERSTAND EN MEETPROTOCOL .....</b>	<b>.....</b>
<b>BIJLAGE 7 STATISTISCHE ANALYSE PROEFPERSONONDERZOEK .....</b>	<b>.....</b>
<b>BIJLAGE 8 MEETDATA KALIBRATIE .....</b>	<b>.....</b>
<b>BIJLAGE 9 THERMOSEM .....</b>	<b>.....</b>

## NOMENCLATUUR

$A$	=	doorstroomoppervlak	[m <sup>2</sup> ]
$A_d$	=	dubois lichaamsoppervlakte	[m <sup>2</sup> ]
$AMV$	=	actual mean vote	[-]
$C$	=	convectieve warmtestroomdichtheid	[W/m <sup>2</sup> ]
$DR$	=	draught rate als gevolg van een luchtstroming van een bepaalde richting	[%]
$D_h$	=	hydraulische diameter	[m]
$f_{cl}$	=	vergrotingsfactor ten gevolge van kleding	[-]
$h_c$	=	convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt	[W/m <sup>2</sup> K]
$h_r$	=	warmteoverdrachtscoëfficiënt straling	[W/m <sup>2</sup> K]
$I_{cl}$	=	thermische weerstand kleding	[m <sup>2</sup> K/W]
$i_f$	=	vochtpermeabiliteitsindex van kleding	[-]
$l$	=	turbulente lengte schaal	[m]
$M$	=	metabolisme	[W/m <sup>2</sup> ]
$PMV$	=	predicted mean vote	[-]
$PPD$	=	aantal ontevreden mensen	[%]
$R_{e,f}$	=	verdampingsweerstand ten gevolge van kleding	[m <sup>2</sup> kPa/W]
$R_t$	=	gemeten weerstand	[Ω]
$RV$	=	relatieve luchtvochtigheid	[%]
$R$	=	warmtestroomdichtheid van afgegeven straling	[W/m <sup>2</sup> ]
$S$	=	bevochtigde omtrek	[m]
$T$	=	temperatuur	[°C]
$t_{eq}$	=	equivalente temperatuur	[°C]
$t_{skin}$	=	huidtemperatuur	[°C]
$TU$	=	turbulentie-intensiteit	[%]
$v_a$	=	gemiddelde lichtsnelheid over periode van één minuut	[m/s]



## HOOFDSTUK 1

### INLEIDING

Het verminderen van het energieverbruik van gebouwen wordt steeds belangrijker (Isaksson et al., 2006). Gebouwen worden beter geïsoleerd, een laag temperatuur verwarmingssysteem wordt toegepast om de primaire energievraag te laten dalen en er kan gebruik worden gemaakt van duurzame energieopwekking (Myhren et al., 2008). Door het beter isoleren van gebouwen worden de oppervlaktetemperaturen van het glas en de buitenwanden steeds hoger, neemt de infiltratie af en zal de invloed van het type ventilatiesysteem op het thermisch comfort steeds groter worden (Ten Bolscher, 2007).

Het gevolg van het gebruik van systemen zoals een laag temperatuur verwarmingssysteem is dat er steeds meer niet-uniforme binnenklimaten in gebouwen ontstaan. Gecombineerd met een ventilatiesysteem met natuurlijke toevoer zijn deze binnenklimaten te kenmerken door de aanwezigheid van warmere of koudere oppervlakken dan de luchttemperatuur en door de aanwezigheid van lokaal verhoogde of verlaagde luchttemperaturen en –snelheden ten opzichte van de rest van de ruimte.

#### 1.1. ACHTERGROND

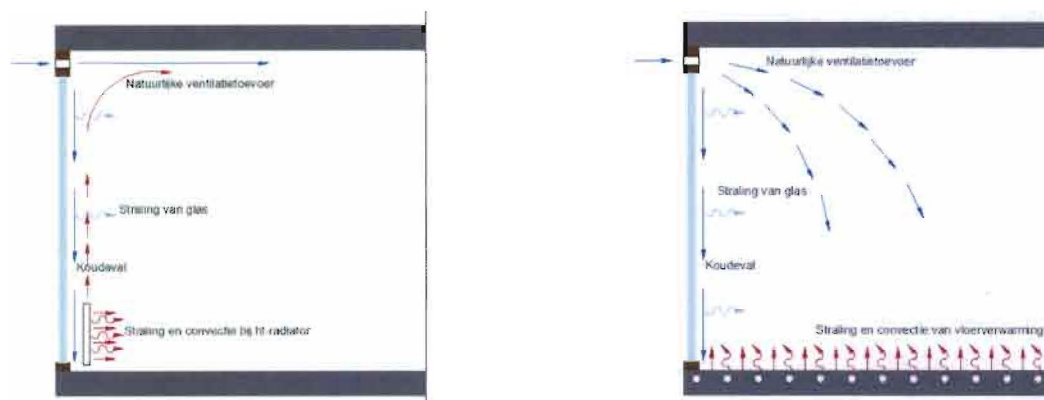
Natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem is aan een comeback begonnen vanwege de kritieken op een gebalanceerd ventilatiesysteem (Toftum (2002), Boerstra (2006), Duijm (2006) en Leidelmeijer et al. (2009)). Er zijn verschillende mogelijke installatie technische oplossingen gevonden en er hebben onderzoeken plaats gevonden naar optredende stromingen om eventuele thermisch comfortklachten zoveel mogelijk uit te sluiten (De Vries et al. (2000), Toftum (2002), Prendergast (2004), Van der Engel (2006), Richter (2007), Myhren et al. (2008), Jacobs (2009), Roijen (2009)).

Ook kan natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem worden toegepast bij goed geïsoleerde gebouwen om het warmte overschot, als gevolg van bijvoorbeeld een (grote) interne warmte last weg te koelen (Isaksson et al. (2006), Santamouris (2006)). Deze koeling kan bij zeer goed geïsoleerde gebouwen al bij buitentemperaturen tussen de 0 en 5°C voorkomen (Hoogervorst, 2009).

Een laag temperatuur verwarmingssysteem wordt gekenmerkt door een aanvoertemperatuur van maximaal 55°C en een retourwatertemperatuur van maximaal 45°C. Hierdoor is de warmtestroom van het verwarmingselement per vierkante meter lager als gevolg van een kleiner temperatuurverschil tussen de binnenlucht en het verwarmingssysteem dan bij hoog temperatuur verwarmingssystemen (Boerstra et al., 2000). Door deze lagere warmtestroomdichtheid kan de convectieve stroming in de ruimte te zwak zijn om een koude val van ventilatielucht tegen te gaan (Myhren et al., 2008). Koude inblaaslucht heeft hierdoor een minder goede kans om zich te mengen met de ruimtelucht, waardoor grote inblaassnelheden niet onderbroken kunnen worden, zie figuur 1, en tochtklachten kunnen ontstaan.

Het ontwerp van het ventilatiesysteem kan grote invloed hebben op het comfort (Van der Engel, 2006) en ook al wordt hier rekening mee gehouden dan blijft het probleem dat het thermisch comfort bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem minder eenvoudig te voorspellen is.

Volgens Hellwig et al. voldoet het PMV-model (NEN-EN-ISO 7730, 2005) niet bij situaties met natuurlijke ventilatietoever. Thermisch comfort in dit soort niet-uniforme binnenklimaten is namelijk meer afhankelijk van het thermisch comfort van de individuele lichaamsdelen dan van het hele lichaam (Zhang et al. 2010).



**Figuur 1.** Schematische illustratie van een te verwachten stromingspatroon van de worp. Links: koude inblaasluucht wordt opgevangen door grote convectieve stroming. Rechts: koude inblaasluucht wordt niet opgevangen door grote convectieve stroming en bereikt de leefzone.

## 1.2. DOELSTELLING

Het doel van dit onderzoek is om meer inzicht te krijgen in de invloed van gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities\* ten opzichte van enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities\*\* op het thermisch comfort, de thermische sensatie en de thermofysiologische responsies in een situatie met een natuurlijke ventilatietoever en een laag temperatuur verwarmingsysteem.

Het tweede doel is het onderzoeken van de thermische comfort voorspellingen met behulp van NEN-EN-ISO 7730 of door een combinatie van CFD, een thermofysiologisch model (ThermoSEM) en een model voor het beoordelen van (lokale) thermische sensatie (Comfort Zones Diagram) voor situaties met natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem.

\* Gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities zijn het gelijktijdig optreden van tocht, stralingstemperatuurasymmetrieën, temperatuurgradiënten en een verhoogde vloertemperatuur. In dit onderzoek ligt de nadruk op tocht en stralingstemperatuurasymmetrieën.

\*\*Onder enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities wordt het optreden van alleen tocht, stralingstemperatuurasymmetrieën, temperatuurgradiënten of een verhoogde vloertemperatuur. In dit onderzoek ligt de nadruk op tocht.



### 1.3. ONDERZOEKSVRAGEN

In dit onderzoek wordt gezocht naar antwoord op de volgende vragen:

1. Welke thermofysiologische en fysische parameters hebben een significante relatie met de thermische sensatie en het thermisch comfort in een situatie met natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem?
2. Wat is de invloed van gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities op het thermisch comfort, de thermische sensatie en de thermofysiologische responsies in een situatie met natuurlijke ventilatie in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem?
  - a. Zijn er significante verschillen in thermisch comfort en thermische sensatie tussen een situatie met enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities en een situatie met gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities?
  - b. Kan een eventueel verschil in thermische sensatie en thermisch comfort verklaard worden aan de hand van een verschil in huidtemperaturen, fysische parameters of door de niet-uniformiteit van het binnenklimaat?
3. Hoe kan het thermisch comfort het best voorspeld worden bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem?
  - a. Wat is de prestatie van NEN-EN-ISO 7730 voor het voorspellen van de algehele thermische sensatie bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem?
  - b. Wat is de prestatie van een combinatie van CFD, ThermoSEM en Comfort Zones Diagram voor het voorspellen van de algehele thermische sensatie bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem?

### 1.4. MAATSCHAPPELIJKE RELEVANTIE

In een situatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem in combinatie met een natuurlijk ventilatietoever beïnvloeden niet-uniforme omgevingscondities het thermisch comfort. Tot nu toe is het onduidelijk of op basis van de huidige thermisch comfort beoordelingsmethoden een goede uitspraak gedaan kan worden over het thermisch comfort in soortgelijke situatie. Indien het thermisch comfort beter voorspeld kan worden zou het thermisch comfort beter in de hand gehouden kunnen worden. Hierdoor is het mogelijk om in de toekomst ontwerpbenaderingen uit te voeren die leiden tot grotere gebruikstevredenheid bij een lager energieverbruik.

### 1.5. WETENSCHAPPELIJKE RELEVANTIE

Een combinatie van natuurlijke ventilatietoever en een laag temperatuur verwarmingsysteem kan hinderlijke luchtsnelheden, luchttemperaturen maar ook stralingstemperatuur asymmetrieën en een te hoge turbulentie-intensiteit veroorzaken. Er is nog weinig kennis aanwezig over hoe mensen zullen reageren op het tegelijk optreden van deze parameters (gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities) maar het is vrijwel zeker dat er lokaal discomfot op kan treden. In welke mate dit lokaal discomfot de algehele thermische sensatie beïnvloedt is nog onbekend (Olesen et al., 2002).

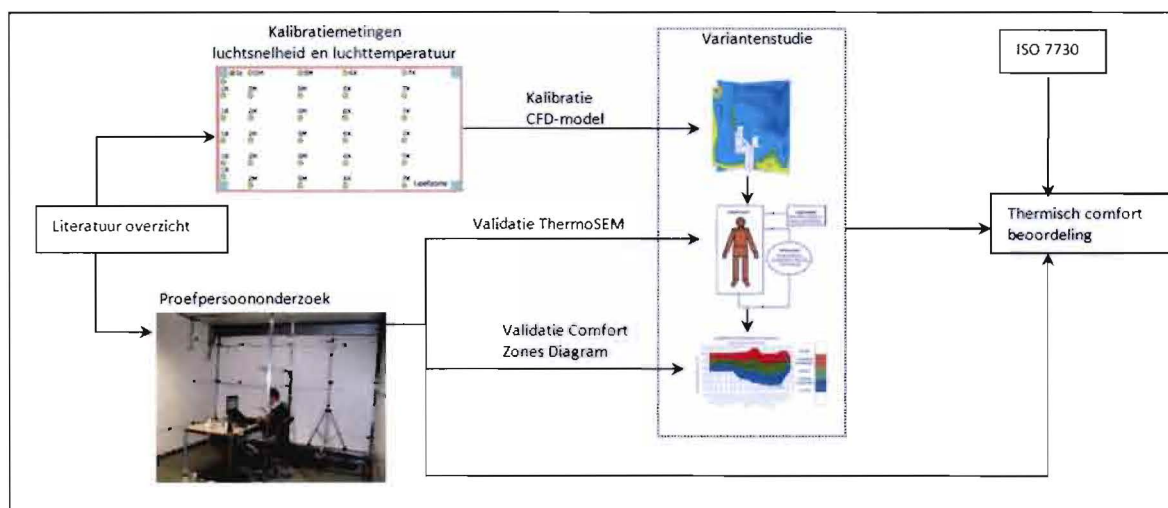
## 1.6. METHODE

Het onderzoek is gestart met een literatuurstudie om meer inzicht te krijgen in de bestaande klachten bij natuurlijke ventilatie en over de tekortkomingen van de PMV bij situaties met natuurlijke ventilatietoever. De literatuurstudie heeft geresulteerd in Van Harten (2010).

Met behulp van een proefpersoononderzoek wordt geprobeerd relaties te vinden tussen thermisch comfort, thermofysiologische responsies en omgevingscondities. De meetresultaten worden ook gebruikt voor het valideren van ThermoSEM en Comfort Zones Diagram. Daarnaast zijn er kalibratiemetingen uitgevoerd voor het CFD-model.

Met behulp van een variantenstudie met behulp van koppeling van het CFD-model, ThermoSEM en Comfort Zones diagram moet er meer inzicht verkregen worden in het thermisch comfort onder omgevingscondities die tijdens de proefpersoononderzoeken niet realiseerbaar zijn.

Aan het eind van het onderzoek wordt de PMV geëvalueerd aan de hand van de resultaten uit het proefpersoononderzoek en de koppeling van het CFD-model, ThermoSEM en Comfort Zones diagram. Daarnaast wordt beoordeeld wat de invloed is van gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities op het thermisch comfort. Een overzicht van de methode die is aangehouden tijdens dit project is te vinden in figuur 2.



**Figuur 2.** Schematisch overzicht van de gebruikte methode tijdens dit onderzoek

## 1.7. INHOUD VERSLAG

In hoofdstuk 2 worden de proefpersoononderzoeken toegelicht en de resultaten ervan. Daarna wordt in hoofdstuk 3 de kalibratiemetingen, de kalibratie van het CFD-model en de variantenstudie met het CFD-model gepresenteerd. De validatie van de combinatie CFD-model, ThermoSEM en Comfort Zones Diagram is te vinden in hoofdstuk 4. Na deze validatie is in dit hoofdstuk ook het resultaat van de variantenstudie van deze modellen te vinden.

Een discussie gebaseerd op het proefpersoononderzoek, de combinatie van CFD, ThermoSEM en Comfort Zones Diagram en het gebruik van NEN-EN-ISO 7730 is te vinden in hoofdstuk 5, gevolg door de conclusies in hoofdstuk 6 en de aanbevelingen voor praktijk en vervolgonderzoek in hoofdstuk 7.

## HOOFDSTUK 2

### PROEFPERSOONONDERZOEK ONDER LABORATORIUMCONDITIES

Het proefpersoononderzoek heeft als doel om significante relaties te vinden tussen thermische sensatie, thermisch comfort, thermofysiologische responsies en thermische acceptatie. Hierdoor kan er meer inzicht verkregen worden in de oorzaak van thermisch comfortklachten bij natuurlijke ventilatie in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem. Ten tweede wordt de invloed van gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities op thermische sensatie, thermisch comfort en thermofysiologische responsies beoordeeld ten opzichte van enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities. Ook wordt de thermische sensatie voorspelling van de PMV geëvalueerd aan de hand van Actual Mean Vote (AMV). De thermofysiologische meetresultaten worden gebruikt voor het valideren van het thermofysiologisch model "ThermSEM"

De toegepaste methode voor het meten van de thermofysiologische responsies, het thermisch comfort en de thermische acceptatie wordt in dit hoofdstuk uitgelegd. Voor een goede beoordeling van de verschillen tussen proefpersonen en casussen is het van belang dat de randvoorwaarden van ieder onderzoek gelijk zijn. Daarom worden in dit hoofdstuk resultaten op het gebied van omgevingsparameters, fysiologische parameters en vragenlijstresultaten gepresenteerd waarna deze geanalyseerd worden.

#### 2.1. METHODE VOOR HET METEN EN BEOORDELEN VAN THERMISCH COMFORT EN THERMOFYSIOLOGISCHE RESPONSIES

In deze paragraaf worden de casussen, de methode voor het vastleggen van omgevingsparameters en de proefpersooneigenschappen, de opbouw van de proefpersoononderzoeken inclusief meetprotocol en de gebruikte vragenlijsten toegelicht.

##### 2.1.1. Casussen voor het meten en beoordelen van thermisch comfort en thermofysiologische responsies

De casussen waaraan de proefpersonen worden blootgesteld zijn een simulatie van situaties met natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem. Deze situaties zijn in de inleiding (hoofdstuk 1) beschreven en resulteren in Casus A en Casus B.

De meeste klachten bij natuurlijke ventilatietoever ontstaan bij lage inlaattemperaturen. Daarom zijn de metingen gebaseerd op de laagst mogelijke inblaastemperatuur van de thermofysiologische onderzoeksruimte, zie tabel 1. De inlaatsnelheid leidt ertoe dat de werp met ventilatielucht op de proefpersoon gericht is, zodat de kans op klachten het grootst wordt. Het uitgangspunt voor de oppervlaktetemperatuur van de wanden, het plafond (casus A en casus B) en de vloer (casus A) is een goed geïsoleerd gebouw (Passivhaustagung, 2011). De vloertemperatuur bij casus B is een veel voorkomende vloertemperatuur voor vloerverwarming (Stichting LTV, 2011), zie tabel 1. De casussen zijn ontworpen op kantooromstandigheden met PMV=0 bij een operationele temperatuur van 21.5°C en een kledingweerstand van 1.0 clo.

**Tabel 1.** Casussen voor natuurlijke ventilatietoevoer in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem

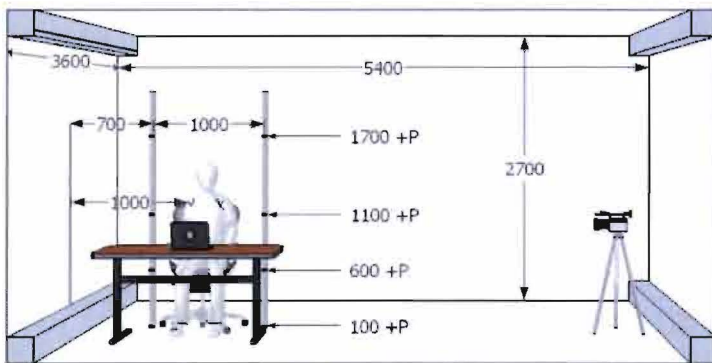
	Randvoorwaarde casus A	Randvoorwaarde casus B
Vloertemperatuur	21.6°C	25.2°C
Wand- en plafondtemperatuur	21.6°C	20.1°C
Inblaastemperatuur	Minimaal mogelijk (17.5°C)	Minimaal mogelijk (16.8°C)
Inlaatsnelheid	1.2 m/s	1.2 m/s
Warmtestroom laptop	20 W	20 W
Warmtestroom verlichting	200 W	200 W

### 2.1.2. Meetmethoden voor omgevingsparameters

Voor het beoordelen van de norm NEN-EN-ISO 7730 en het onderzoeken van de invloed van omgevingscondities op thermisch comfort en thermofysiologische responsies worden de luchttemperatuur, de luchtsnelheid, de turbulentie-intensiteit, de oppervlaktetemperatuur, de gemiddelde stralingstemperatuur, de verticale temperatuur gradiënt tussen hoofd en enkels en de stralingstemperatuur asymmetrie gemeten of berekend overeenkomstig NEN-EN-ISO 7726. In bijlage 2 is meer informatie te vinden over de toegepaste meetinstrumenten en berekeningsmethodes.

#### POSITIONERING MEETSSENSOREN EN PROEFPERSOON

Het meten van de omgevingscondities vindt plaats met twee statieven, die aan weerszijden op 30cm afstand, van de proefpersoon staan ( figuur 3) Op deze statieven bevinden zich op een hoogte van 0.1m, 0.6m, 1.1m en 1.7m (conform NEN-EN-ISO 7726) luchttemperatuur-, relatieve luchtvochtigheid- en luchtsnelheidsensoren. De oppervlaktetemperatuur van het plafond, de wanden en de vloer wordt per oppervlak vastgelegd met 9 sensoren, waaruit het gemiddelde per vlak berekend wordt. Een overzicht van deze meetposities is te vinden in bijlage 2. Figuur 4 presenteert de thermofysiologische onderzoeksruimte met daarin enkele oppervlakte-temperatuursensoren, de statieven voor het meten van de omgevingscondities en een statief voor het meten van de luchttemperatuur en luchtsnelheid van de inblaaslucht. Tijdens de meetsessies zijn er infraroodopnamen gemaakt om de stralingstemperatuurasymmetrieën in kaart te brengen.



**Figuur 3** Maatvoering statieven voor luchttemperatuur-, luchtsnelheid, en relatieve luchtvochtigheidsensoren en positionering infraroodcamera.



**Figuur 4** Positionering meetsensoren

### 2.1.3. Proefpersonen

Aan het onderzoek hebben 10 gezonde mannelijke proefpersonen deelgenomen van  $23.5 \pm 1.7$  jaar. Antropomorfische eigenschappen kunnen de thermofysiologische responsies en het thermisch comfort beïnvloeden en zijn daarom vastgelegd. In tabel 2 zijn de resultaten te vinden en hieruit kan geconcludeerd

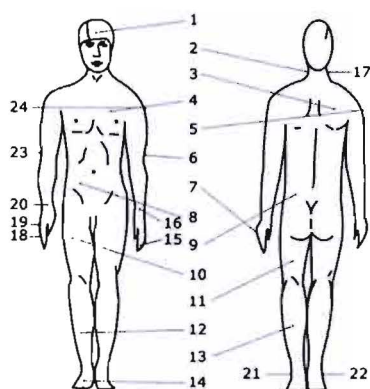
worden dat de groep proefpersonen redelijk homogeen is (Vetpercentage huidplooï is  $16.8 \pm 3.9\%$  en geen proefpersoon is een outlier).

**Tabel 2.** Antropomorfisch overzicht proefpersonen

	Leeftijd [jaar]	Lengte [m]	Gewicht [kg]	Totaal huidplooïen [mm]	Waist/hip ratio [-]	$A_0$ [m <sup>2</sup> ]	BMI [-]	Vet% BMI [%]	Vet% Huidplooï [%]
PP37	23	1.970	84.8	36	0.81	2.18	21.85	15.31	14.90
PP38	24	1.855	75.5	50	0.87	1.99	21.94	15.65	18.95
PP40	22	1.870	80.2	39	0.84	2.05	22.93	16.38	15.86
PP41	25	1.785	69.3	53	0.87	1.87	21.75	15.65	19.51
PP42	23	1.875	92.5	73	0.91	2.17	25.88	20.15	23.53
PP43	24	1.770	67.5	21.3	0.91	1.83	21.55	15.17	8.71
PP44	25	1.845	76	51.7	0.88	1.99	22.33	16.34	19.27
PP45	23	1.830	71.6	38	0.81	1.93	21.38	14.75	15.44
PP46	20	1.790	69.8	36	0.84	1.88	21.78	14.54	14.90
PP47	26	1.910	91.2	43	0.92	2.20	25.00	19.78	17.13

#### 2.1.4. Meetmethoden voor thermofysiologische parameters

Voor het onderzoeken van de thermofysiologische responsies zijn de huidtemperaturen en kerntemperatuur gemeten. De huidtemperatuur is gemeten met behulp van iButtons (fabrikant Maxim) op 24 posities, zie figuur 5, waarvan de nummers 1, 3 t/m 14 overeenkomen NEN-EN-ISO 9886 (2004) voor het berekenen van de gemiddelde huidtemperatuur. De overige posities zijn toegevoegd voor het vaststellen van de huidtemperaturen van de extremiteiten, het mogelijk optreden van vasomotie en de verschillen in huidtemperatuur tussen de linkerkant en rechterkant van het lichaam. De kerntemperatuur is gemeten met behulp van een capsule die 60 minuten voor aanvang oraal ingenomen werd. Meer informatie over de toegepaste meetinstrumenten is te vinden in bijlage 2. Tijdens de meetsessies zijn er infraroodopnamen gemaakt om de temperatuurverdeling over het lichaam van de proefpersoon in kaart te brengen.



- |                               |                           |
|-------------------------------|---------------------------|
| 1. Voorhoofd                  | 13. Linker kuit           |
| 2. Linkerzijde nek            | 14. Rechter wreef         |
| 3. Rechter schouderblad       | 15. Vingertop linkerhand  |
| 4. Linker borst               | 16. Linker onderarm       |
| 5. Rechter bovenarm           | 17. Rechterzijde nek      |
| 6. Linker bovenarm            | 18. Vingertop rechterhand |
| 7. Linkerhand                 | 19. Rechterhand           |
| 8. Rechterzijde buik          | 20. Rechter onderarm      |
| 9. Linkerzijde onderrug       | 21. Linker enkel          |
| 10. Voorkant rechter dijbeen  | 22. Rechter enkel         |
| 11. Achterkant linker dijbeen | 23. Rechter bovenarm      |
| 12. Rechter scheenbeen        | 24. Linker bovenarm       |

**Figuur 5** Overzicht meetposities huidtemperaturen

#### 2.1.5. Meetprotocol

Een goede vergelijking tussen de verschillen in thermofysiologische responsies en thermisch comfort bij verschillende proefpersonen kan alleen gemaakt worden wanneer de variatie in externe invloeden zo klein mogelijk gehouden worden. Dit betekent dat de kledingweerstand, het metabolisme, de voeding, en het tijdschema voor iedere proefpersoon gelijk is (Van Harten, 2010).

#### KLEDINGWEERSTAND

De proefpersonen hebben standaard kleding gedragen, die bestond uit een polo en een vest (beiden met de kraag omlaag) en een broek, allen van 100% katoen. De proefpersonen hebben hun eigen ondergoed, sokken en lage schoenen gedragen. De thermische en hygrische eigenschappen van de kleding zijn bepaald aan de hand van NEN-EN-ISO 9920 (2007) en McCullough et al. (1989 en 1994). De proefpersonen zaten op een bureaustoel, waardoor de totale kledingweerstand 1.0 clo bedroeg, zie bijlage 6.

#### METABOLISME

De proefpersonen hebben kantoortaken verricht, zodat ze ongeveer een metabolisme van 1.2 met hebben. Deze kantoortaken bestonden uit door de proefpersoon zelf meegebrachte type, lees of schrijfwerkzaamheden en uit het beantwoorden van vragenlijsten op het gebied van thermisch comfort. Het metabolisme kan per proefpersoon of per tijdstip licht variëren, maar volgens Timmers (2008) heeft dit op de PMV een minimale invloed.

#### VOEDING

De voeding die de proefpersoon gedurende de hele meetsessie in mag nemen is gestandaardiseerd en bestond uit een lunch (twee witte bolletjes, waarvan één met kaas en één met ham). Gedurende de rest van de dag mocht de proefpersoon biscuitjes en water nuttigen, het gebruik ervan is niet geregistreerd.

#### VRAGENLIJSTEN

Het thermisch comfort wordt onderzocht met behulp van vragenlijsten, zie bijlage 3. Deze zijn ontworpen met behulp van NEN-EN-ISO 10551 (1995) en ASHRAE standaard 55 (2004) en zijn erop gericht om meer inzicht te geven in het algeheel en lokaal thermisch comfort en sensatie, de thermische acceptatie, de perceptie van (lokale) luchtbewegingen en of men een koudere of warmere omgeving prefereert. De lokale lichaamsdelen waar een aantal vragen betrekking op hebben gehad zijn gepresenteerd in figuur 6. Voor het beoordelen van de algehele en lokale thermische sensatie is er gebruik gemaakt van ASHRAE'S thermische sensatie schaal die gepresenteerd is op een 'Visual-Analogue Scale' (VAS) (Kildesø et al., 1999). De overige vragen kunnen beantwoord worden door een van de voorgelegde antwoorden in te vullen.

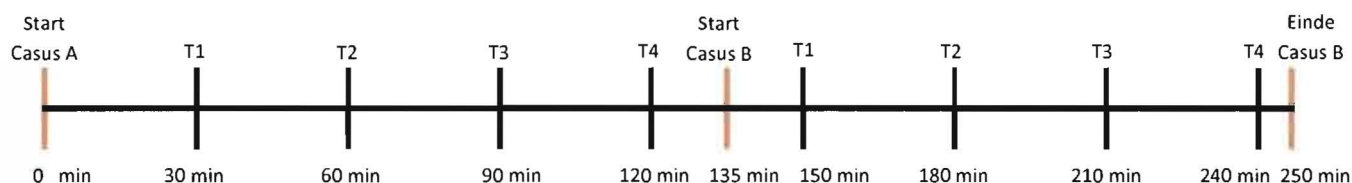


**Figuur 6** Overzicht voor beoordelen lokaal thermisch comfort en lokale thermische sensatie tijdens proefpersoononderzoek

#### VERLOOP VAN EEN MEETDAG

Aan het begin van de meetdag hebben de proefpersonen de proefpersooninformatie doorgelezen, de toestemmingsverklaring ondertekend, zie bijlage 6, en de kerntemperatuur capsule ingenomen. Na het aantrekken van de standaardkleding is de proefpersoon begonnen met een lichte bewegingsoefening. Deze bestond uit het op- en afstappen van een verhoging, die in rustig tempo 5 minuten lang moest worden volgehouden. Na deze oefening zijn de antropomorfische eigenschappen van de proefpersoon vastgelegd en

zijn de huidtemperatuursensoren aangebracht. In de thermofysiologische onderzoeksruimte heeft de proefpersoon een korte uitleg over de vragenlijsten en over de procedure gekregen. Tijdens de meetsessie heeft de proefpersoon enkele bewegingsoefeningen moeten verrichten om de doorbloeding naar de benen en voeten te stimuleren. Het proefpersoononderzoek werd gecombineerd met een onderzoek naar koudeval. Hierdoor konden de meetsessies de ene dag in de ochtend plaatsvinden en de andere dag in de middag. Per meetsessie zijn er vier vragenlijsten ingevuld, zie figuur 7.



**Figuur 7** Tijdslijn over de dag tijdens een proefpersoononderzoek, T1 is tijdstip waarop de eerste vragenlijst werd afgenomen.

### 2.1.5. Hypotheses toetsen

Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden zijn er een aantal hypothesen opgesteld om relaties te vinden tussen de (lokale) thermische sensatie, het (lokale) thermisch comfort, (lokale) huidtemperaturen en (lokale) omgevingscondities. De meest belangrijkste hypothesen zijn:

1. De algehele thermische sensatie wordt significant beïnvloed door de lokale thermische sensatie
  - a. De lokale thermische sensatie wordt significant beïnvloed door huidtemperaturen
  - b. De lokale thermische sensatie wordt significant beïnvloed door lokale omgevingscondities
2. Het algehele thermisch comfort wordt significant beïnvloed door het lokale thermisch comfort
  - a. Het lokale thermisch comfort wordt significant beïnvloed door huidtemperaturen
  - b. Het lokale thermisch comfort wordt significant beïnvloed door lokale omgevingscondities

Ook zijn er hypothesen opgesteld om een mogelijk verschil in thermische sensatie of thermisch comfort vast te kunnen stellen tussen Casus A en Casus B en om te beoordelen of de PMV een goede voorspeller is van de thermische sensatie bij niet-uniforme omgevingscondities. De overige hypothesen zijn te vinden in bijlage 4; in tabel 3 staan de variabelen die getoetst worden in relatie met de algehele thermische sensatie en het algehele thermisch comfort. De hypothesen worden alleen getoetst met de thermisch comfort en thermische sensatie beoordelingen op T4 van iedere casus. De fysische en thermofysiologische karakteristieken zijn een gemiddelde van een periode van 10 minuten rondom T4 (5 minuten voor en 5 minuten na het toetsingsmoment). De statistische methoden die gebruikt worden zijn linear mixed models, Kendall's tau en Wilcoxon signed-rank test. De overige analyses zijn gebaseerd op T3 en T4, zoals de beoordeling van de PMV.

**Tabel 3** Variabelen in hypothesen voor het verklaren van de algehele thermische sensatie en het geheel thermisch comfort

Huidtemperatuur, lokale thermische sensatie en lokaal thermisch comfort	Overig thermofysiologische responsies	Omgevingconditie	Niet-uniforme omgevingscondities
Distaal* Proximaal Hoofd (Van Harten, 2010) Handen (Van Harten, 2010) Voeten (Van Harten, 2010)	Vasomotie Gemiddelde huidtemperatuur (NEN-EN-ISO 9886) Huidtemperatuurgradiënten (Fiala, 1998) Kerntemperatuur Verschil proximaal en distaal	Luchttemperatuur Luchtsnelheid Gemiddelde stralingstemperatuur Turbulentie-intensiteit	Verticale temperatuurgradiënt Vloertemperatuur Tocht (samenvoeging van luchtsnelheid, luchttemperatuur en turbulentie-intensiteit) Stralingstemperatuur asymmetrie

\* dit is geen variabele van het lokaal thermisch comfort

**LINEAR MIXED MODELS**

Een linear mixed model is een model dat in situaties met herhaalde metingen relaties kan toetsen tussen een afhankelijke variabele en verschillende verklarende variabelen. Herhaalde metingen zijn meerdere metingen van dezelfde variabele, zoals een herhaling in de tijd (geldt hier voor vier vragenlijsten per casus) of het blootstellen van dezelfde proefpersoon aan meerdere condities. Een linear mixed model neemt de invloed van individuele verschillen binnen in een populatie meenemen. Een nadeel van het model is dat het alleen geschikt is voor normaal verdeelde dataset (West et al., 2007); hetgeen niet het geval is bij de verkregen datasets uit het proefpersoononderzoek. Daarom worden de gevonden relaties ook getoetst met Kendall's tau.

**KENDALL'S TAU**

Kendall's tau is een methode om de correlatie tussen verschillende variabelen te berekenen. Deze methode is gebaseerd op rangnummers van de data in plaats van de data zelf, waardoor het geschikt is voor datasets die op interval (ook niet parametrische datasets) als op ordinale schaal gemeten zijn. Daar komt bij dat deze methode geschikt is voor kleine datasets en voor datasets met veel dezelfde beoordelingen (Field, 2009). In dit onderzoek is een correlatie groter dan 0.323 significant ( $p < 0.05$ ).

**WILCOXON SIGNED-RANK TEST**

De Wilcoxon signed-rank test is een niet-parametrische statistische hypothese toetsingsmethode die gebruikt kan worden voor het toetsen van data die verkregen is op basis van herhaalde metingen uit dezelfde steekproef (Field, 2009).

**2.2. RESULTATEN VAN HET PROEFPERSONENONDERZOEK**

In deze paragraaf worden eerst omgevingscondities gepresenteerd, gevolgd door de thermofysiologische responsies en de resultaten van de vragenlijsten, waarna er een analyse plaatsvindt.

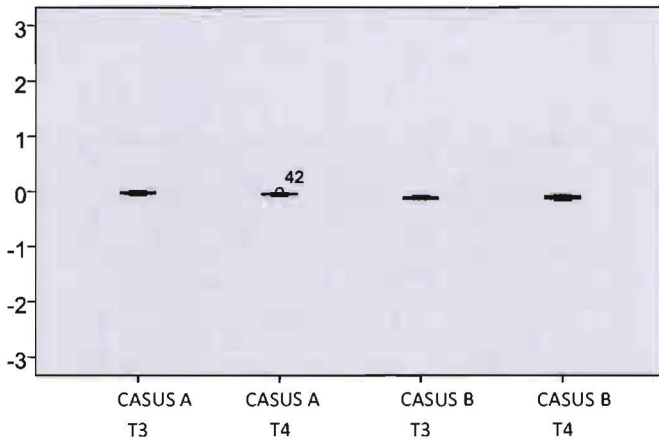
**2.2.1. Omgevingscondities**

Om te beoordelen of ervaringen uit het eerste deel van een casus een rol hebben gespeeld bij de thermisch comfort beoordeling op T4, zijn de omgevingscondities rond de toetsingsmomenten T3 en T4 met elkaar vergeleken in de vorm van de PMV en de Draught Rate (DR). Uit de meetresultaten van de proefpersonen is gebleken dat de PMV op T3 en T4 een waarde aan kan nemen van tussen de -0.18 en 0.01. Dit impliceert dat op basis van deze voorspeller de omgeving thermisch neutraal is. De Draught Rate (DR) neemt waarden aan tussen de 5% en de 8% voor casus A en tussen de 11% en de 14% voor casus B, zie figuur 9 en tabel 4. Hierbij moet worden opgemerkt dat de DR wordt onderschat vanwege een langere responsietijd van de gebruikte hete bol anemometer (Loomans et al., 2002). Dit kan bijvoorbeeld resulteren in een onderschatting van het aantal ontevreden van 24% wanneer de turbulentie-intensiteit wordt onderschat met 20% bij een lichtsnelheid van 0.20 m/s. Op basis van de meetresultaten valt casus A volledig in de ontwerpklasse A (een zeer goed binnenklimaat) en casus B in ontwerpklasse B (een goed binnenklimaat) (NEN-EN-ISO 7730, 2005). Het verschil tussen de PMV ( $p < 0.005$ ) en de DR ( $p < 0.005$ ) is significant voor T4 van beide casussen.

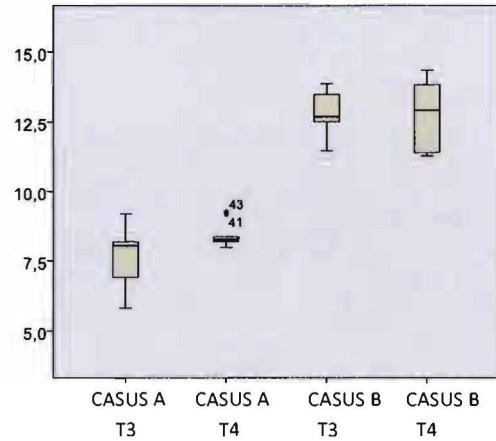
**Tabel 4** Error bar PMV en Draught Rate op basis van gemeten condities tijdens proefpersoononderzoeken

	PMV				Draught Rate [%]			
	Casus A	Casus A	Casus B	Casus B	Casus A	Casus A	Casus B	Casus B
	T3	T4	T3	T4	T3	T4	T3	T4
Gem±Stdev	-0.03±0.02	-0.05±0.02	-0.12±0.02	-0.12±0.03	7.75±0.95	8.41±0.44	12.88±0.71	12.80±1.19
Min	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	5.8	8.0	11.5	11.3
Max	0.0	0.0	-0.1	-0.1	9.2	9.3	13.9	14.4





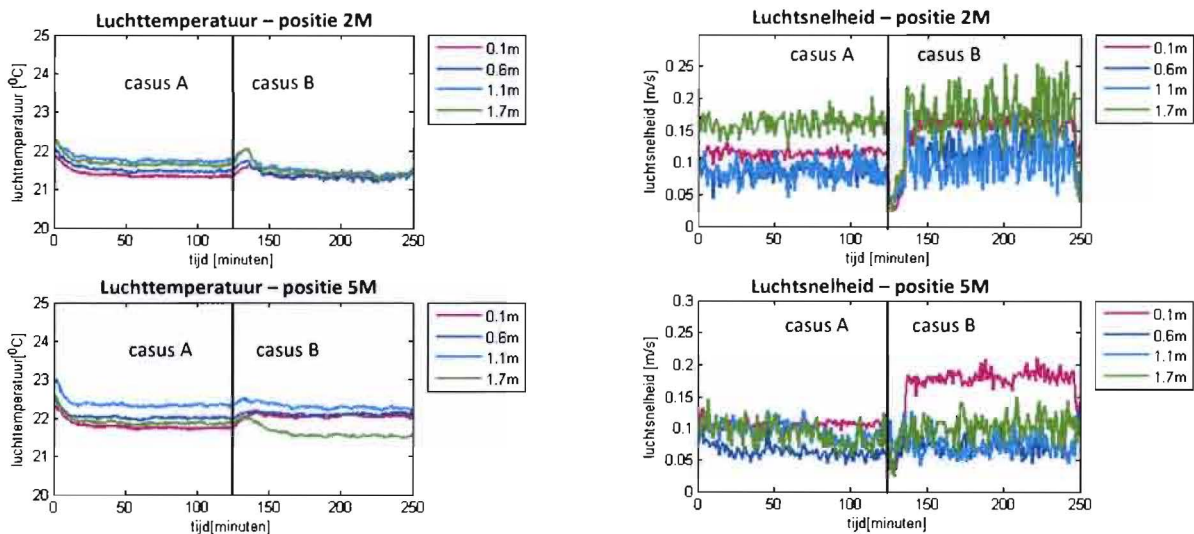
**Figuur 8** Boxplot PMV op basis van de omgevingcondities van alle proefpersoononderzoeken



**Figuur 9** Boxplot Draught Rate [%] op basis van de omgevingcondities van alle proefpersoononderzoeken

De optredende luchttemperaturen en –snelheden zijn zowel verschillend tussen beide casussen als tussen de verschillende sensoren binnen een casus, zie figuur 10. Deze verschillen kunnen verklaard worden door een verschil in inblaasttemperatuur en een verschil in thermisch gedreven stromingen als gevolg van verschillende vloertemperaturen. De meetresultaten impliceren dat de condities in de klimaatkamer niet-uniform zijn en dat de proefpersoon bij casus B, waar ook een stralingstemperatuurasymmetrie aanwezig is, blootgesteld is geweest aan gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities.

Luchttemperatuur, luchtsnelheid, turbulentie-intensiteit, gemiddelde stralingstemperatuur, verticale temperatuurgradiënt, vloertemperatuur en stralingstemperatuurasymmetrie zijn allen significant ( $p < 0.001$ , Wilcoxon signed-rank test) verschillend gebleken tussen T4 van casus A en casus B.

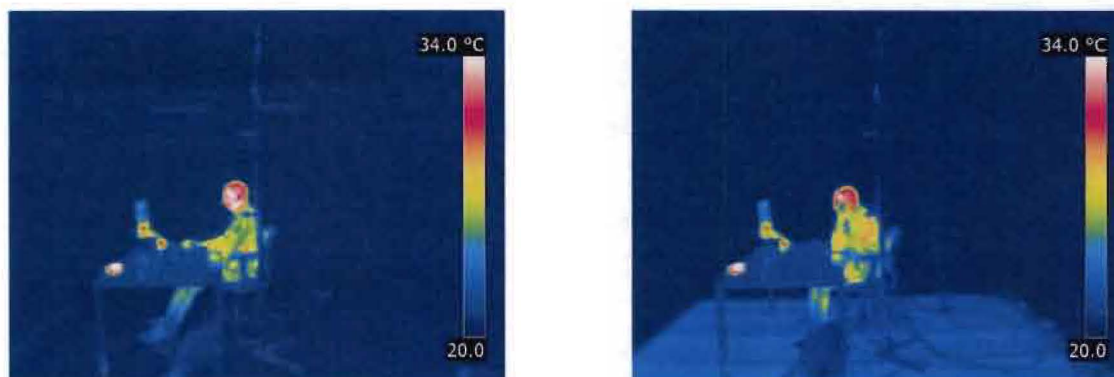


**Figuur 10** Gemeten luchttemperatuur en luchtsnelheid bij PP37

### 2.2.2. Fysiologisch respons

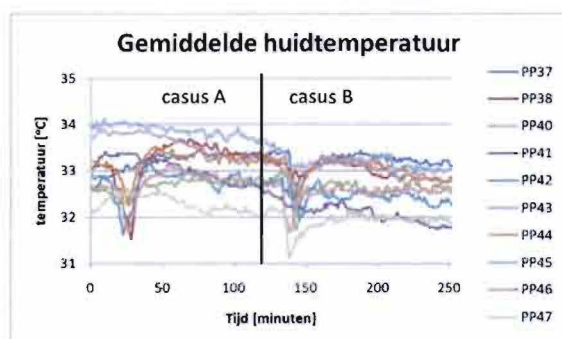
In deze paragraaf worden de resultaten van de proximale en distale huidtemperaturen besproken, alsmede het resultaat voor vasomotie (temperatuurverschil onderarm-vingertop) en de gemiddelde huidtemperaturen (NEN-EN-ISO 9886, 2004). De huidtemperaturen zijn niet-uniform voor het lichaam, zie figuur 11. Zo is bij beide casussen de temperatuur van het hoofd hoger dan die van de handen. Met behulp van deze

thermogrammen kan er geen direct verschil in huidtemperatuurverdeling tussen beide casus aangewezen worden. Daarvoor zal een statistische analyse uitgevoerd moeten worden. Gedurende de casussen is er geen significant verschil gemeten in kerntemperatuur.



**Figuur 11** Thermogram PP46, links casus A, rechts casus B.

Tussen de casussen is er een significant verschil ( $p < 0.008$ , Wilcoxon signed-rank test) van  $0.4^{\circ}\text{C}$  gemeten in de gemiddelde huidtemperatuur, zie figuur 12. Dit verschil zou mogelijk te wijten kunnen zijn aan de significant verschillen in omgevingscondities tussen casus A en casus B, zie bijlage 5. Echter, met behulp van het lineair mixed model is gebleken dat de gemiddelde huidtemperatuur niet significant verklaard wordt door de omgevingscondities.



**Figuur 12** Verloop gemiddelde huidtemperatuur Casus A en Casus B van alle proefpersonen

Een analyse van de proximale en distale huidtemperaturen geeft een beter inzicht, zie figuur 13 en 14, tabel 7 en 8. Er is een significant verschil ( $p < 0.007$ ) gevonden tussen de distale huidtemperatuur van Casus A en Casus B. Ook blijkt het verschil tussen de proximale en distale huidtemperaturen voor beide casussen significant ( $p < 0.037$ ) te zijn, waarbij het verschil in casus B groter is dan casus A. De combinatie van luchttemperatuur, luchtsnelheid en turbulentie-intensiteit (tocht) heeft een significante invloed ( $p < 0.025$ ) op dit verschil gehad. De distale en proximale huidtemperatuur worden afzonderlijk niet significant door tocht beïnvloed. De proximale huidtemperatuur wordt alleen significant ( $p < 0.009$ ) door de turbulentie-intensiteit beïnvloed.

**Tabel 6** Standaard error voor de proximale huidtemperatuur op basis van het respons alle proefpersonen

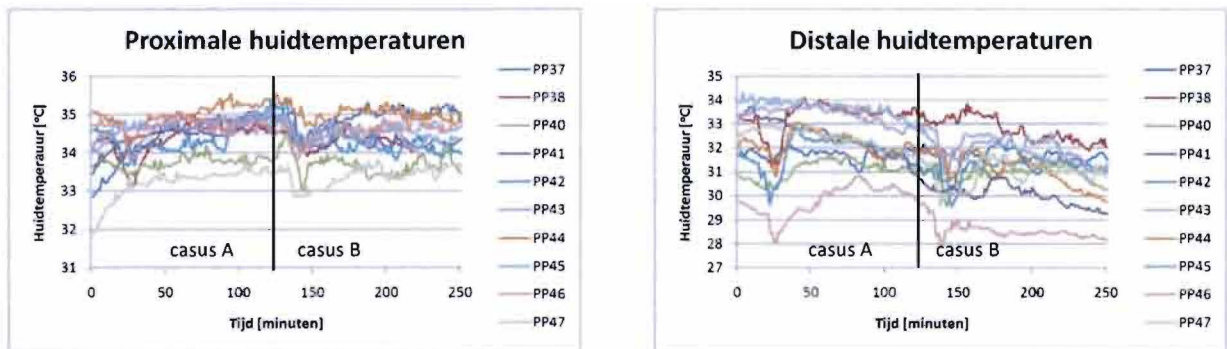
	Casus A - T4 [°C]	Casus B - T4 [°C]
Gem±Stdev	34.6±0.59	34.7±0.48
Min	33.2	33.41
Max	35.2	34.7

**Tabel 5** Standaard error voor de gemiddelde huidtemperatuur op basis van het respons van alle proefpersonen

	Casus A - T4 [°C]	Casus B - T4 [°C]
Gem±Stdev	33.0±0.46	32.6±0.46
Min	32.1	31.8
Max	33.6	33.1

**Tabel 7** Standaard error voor de distale huidtemperatuur op basis van het respons alle proefpersonen

	Casus A - T4 [°C]	Casus B - T4 [°C]
Gem±Stdev	30.8±1.26	29.4±1.38
Min	28.5	26.5
Max	32.9	31.0



**Figuur 13** Verloop proximale en distale huidtemperaturen van alle proefpersonen.

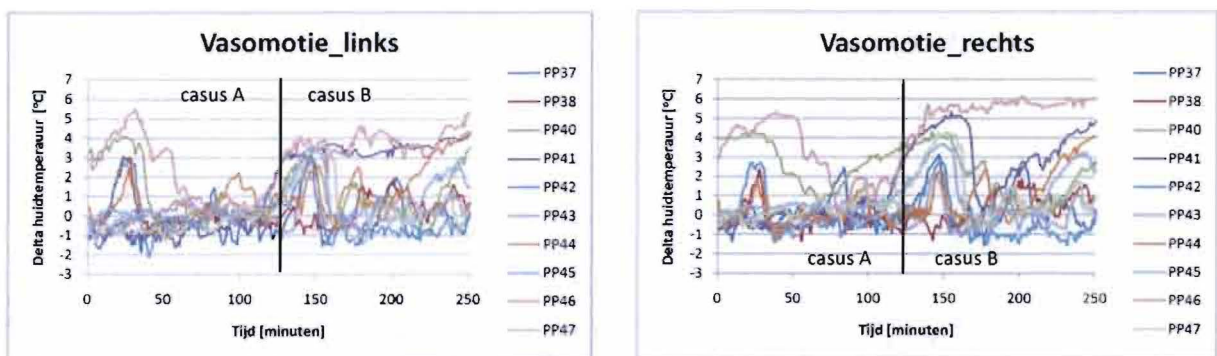
In figuur 14 en tabel 9 en 10 is de vasomotie (van onderarm – vingertop) van beide lichaamshelften te zien. Bij de meeste proefpersonen fluctueert het huidtemperatuurverschil met 2°C rond de nul en dit betekent dat de vasomotie die optreed niet van betekenis is geweest (Wang et al., 2007). Ook is te zien dat er een half uur na het begin van een casus vasoconstrictie op gaat treden en dat het verdere verloop zeer persoonsgebonden is. Bij sommige proefpersonen is er een duidelijk verschil te zien tussen de vasomotie links en rechts. Dit zou verklaard kunnen worden door het verschil in gemeten condities (luchttemperatuur en luchtsnelheid) bij beide statieven. Er is er een significant verschil ( $p < 0.025$ ) van  $-0.1^\circ\text{C}$  waargenomen in delta huidtemperatuur van onderarm en vingertop tussen beide casussen. Er zit geen significant verschil tussen de vasomotie van beide lichaamshelften.

**Tabel 9** Standaard error voor vasomotie (temperatuurgradiënt onderarm – vingertop) linker arm

	Casus A - T4 [ $\Delta T$ °C]	Casus B- T4 [ $\Delta T$ °C]
Gem±Stdev	1.0±1.57	3.7±3.77
Min	-1.5	-1.1
Max	3.3	5.3

**Tabel 10** Standaard error voor vasomotie (temperatuurgradiënt onderarm – vingertop) rechter arm

	Casus A - T4 [ $\Delta T$ °C]	Casus B - T4 [ $\Delta T$ °C]
Gem±Stdev	1.9±2.90	4.2±4.31
Min	-1.9	-1.3
Max	6.9	11.7



**Figuur 14** Gemeten vasomotie (temperatuurgradiënt onderarm – vingertop) linker arm en rechter arm.

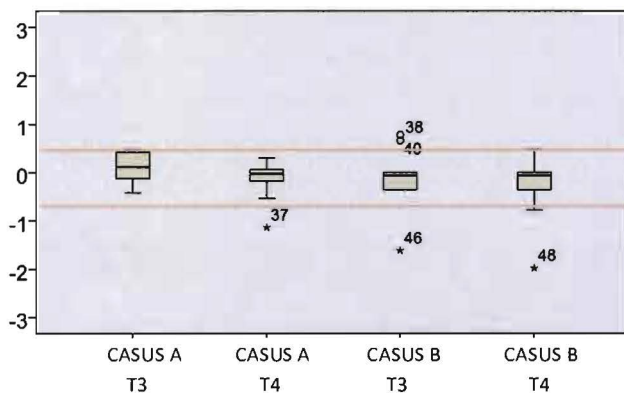
### 2.2.3. Resultaten comfortvragenlijsten

In deze paragraaf worden de resultaten van de comfortvragenlijsten besproken. Er zal alleen ingegaan worden op de (lokale) thermische sensatie, het (lokale) thermisch comfort, de acceptatie van de ruimte, de perceptie van luchtbewegingen en mogelijke veranderingen in temperatuur.

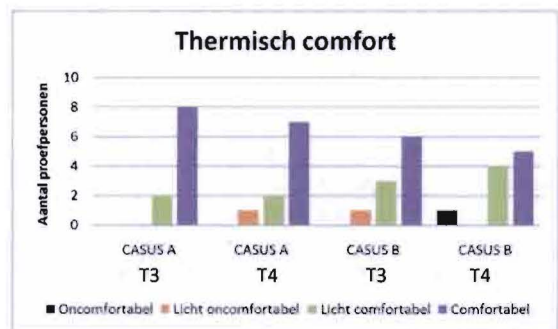
De resultaten van de algehele thermische sensatie zijn terug te vinden in de boxplot in figuur 15 en in tabel 11. Hieruit blijkt dat het merendeel van de beoordelingen voor casus A en casus B binnen de grenzen van  $-0.5 < PMV < +0.5$  (klimaatklasse B) valt. Ook vonden de meeste proefpersonen het klimaat van beide casussen comfortabel tot licht comfortabel. Uit de statistische analyse is gebleken dat er geen significante verschillen zijn gemeten tussen de algehele thermische sensatie en het algehele thermisch comfort van casus A en casus B. In de resultaten komen ook enkele outliers (aangegeven met een \*) voor. Een outlier is een waarde die meer dan drie keer de standaarddeviatie van het gemiddelde verwijderd is. De thermische sensatiebeoordelingen van PP37 en PP46, zie figuur 15, kunnen te wijten zijn aan een lagere lokale thermische sensatie beoordeling, zie figuur 16, Ondanks deze thermische sensatie beoordeling geeft PP46 aan zich niet oncomfortabel te voelen, terwijl PP37 bij casus A, T4 zich licht oncomfortabel voelt. In totaal vindt een proefpersoon bij Casus B, T4 het oncomfortabel.

**Tabel 11** Standaard error voor thermische sensatie beoordeling op basis van alle proefpersoononderzoeken

	Casus A - T3	Casus A - T4	Casus B - T3	Casus B - T4
Gem±Stdev	0.1±0.31	-0.1±0.42	-0.1±0.65	-0.3±0.67
Min	-0.4	-1.1	-1.6	-2.0
Max	0.5	0.3	0.8	0.5



**Figuur 15** Boxplot algehele thermische sensatie op basis van alle proefpersoononderzoeken

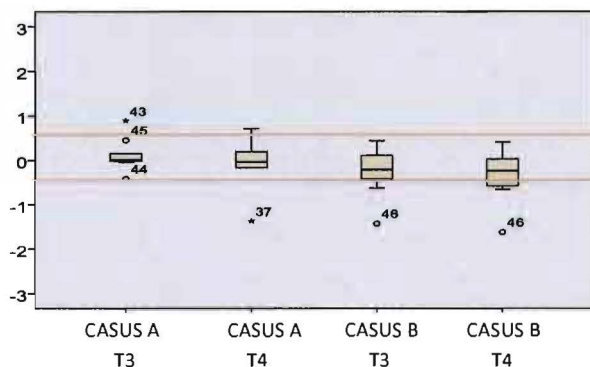


**Figuur 16** Respons algeheel thermisch comfort op basis van alle proefpersoononderzoeken

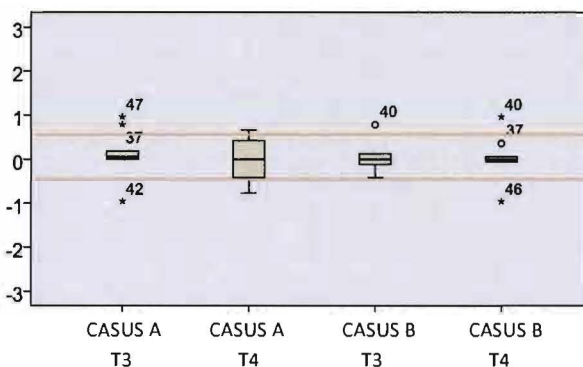
Het merendeel van de distale en proximale thermische sensatie beoordelingen liggen eveneens binnen het interval  $-0.5 < PMV < +0.5$ , maar er zijn veel meer outliers dan bij de algehele thermische sensatie. De thermische sensatie beoordeling van deze outliers is kouder voor de distale lichaamsdelen dan voor de proximale lichaamsdelen.

**Tabel 12** Standaard error voor thermische sensatie beoordeling

	Distale thermische sensatie				Proximale thermische sensatie			
	Casus A - T3	Casus A - T4	Casus B - T3	Casus B - T4	Casus A - T3	Casus A - T4	Casus B - T3	Casus B - T4
Gem±Stdev	0.1±0.35	-0.0±0.55	-0.3±0.52	-0.3±0.56	0.1±0.51	-0.0±0.48	0.0±0.32	0.0±0.47
Min	-0.4	-1.4	-1.4	-1.6	-1.0	-0.8	-0.4	-1.0
Max	0.9	0.7	0.4	0.4	1.0	0.7	0.8	1.0



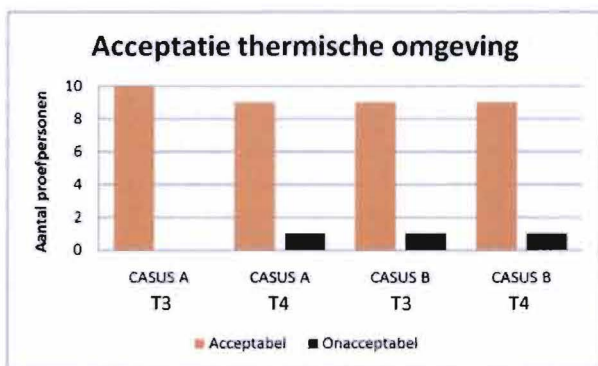
**Figuur 17** Boxplot distale thermische sensatie op basis van alle proefpersoononderzoeken



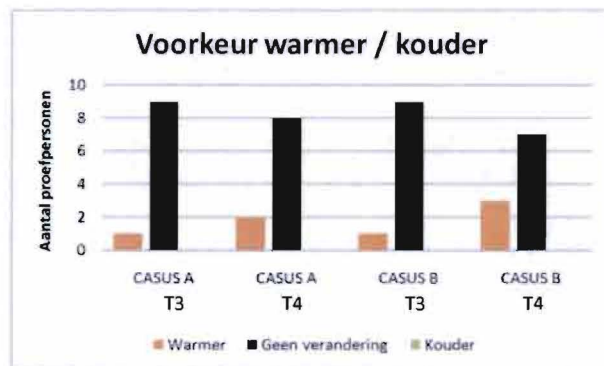
**Figuur 18** Boxplot proximale thermische sensatie op basis van alle proefpersoononderzoeken

De acceptatie van de thermische omgeving is hoog, zie figuur 19; per casus vindt maximaal 1 proefpersoon de situatie onacceptabel. Er blijkt een overeenkomst te zijn tussen de proefpersonen die de thermische situatie onacceptabel vonden en die outliers zijn bij de algehele thermische sensatie. Uit figuur 20 blijkt dat de meeste proefpersonen geen voorkeur voor een warmere of een koudere omgeving hadden, maar de voorkeur voor een warmer omgeving neemt wel toe in de tijd. Ook verschilt het aantal proefpersonen dat een warmere omgeving wenst met het aantal proefpersonen dat de omgeving onacceptabel vindt. Dus deze voorkeur heeft geen directe invloed te hebben op de acceptatie van de ruimte.

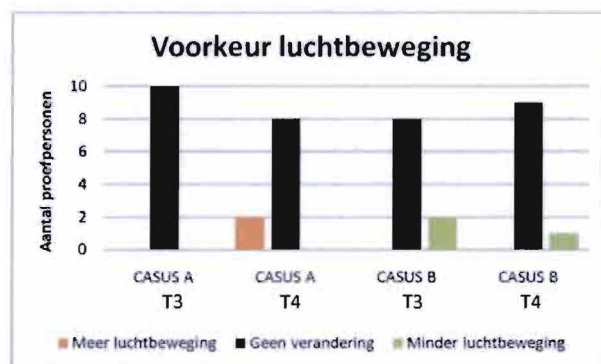
De meeste proefpersonen wensten geen verandering in luchtbewegingen. Bij casus A, T4, wordt er twee keer om meer luchtbeweging gevraagd, maar ook twee keer om een warmere omgeving. Bij casus B, T4, wordt een keer om minder luchtbewegingen gevraagd, maar twee keer om een warmere omgeving.



**Figuur 19** Frequenties beoordeling acceptabel/onacceptabel



**Figuur 20** Frequenties beoordelingen voorkeur warmer/kouder



**Figuur 21** Frequenties beoordelingen voorkeur luchtbeweging

### 2.2.4. Relatie tussen thermisch comfort, thermofysiologische responsies en omgevingscondities

In deze paragraaf zijn de significante verklarende parameters voor het thermisch comfort en de thermische sensatie weergegeven die met behulp van de hypothesen zijn gevonden. Hierbij wordt het significantieniveau bepaald met behulp van linear mixed model (co-variaat) en de correlatie met behulp van Kendall's tau (correlatie). In bijlage 7 is een overzicht van alle gevonden relaties terug te vinden.

#### ALGEGELE THERMISCHE SENSATIE VERKLAARD DOOR DE LOKALE THERMISCHE SENSATIE

De distale thermische sensatie, de proximale thermische sensatie en de thermische sensatie van de handen, de voeten en het hoofd hebben een significante relatie met de algehele thermische sensatie, zie tabel 13.

**Tabel 13** Significantie en correlatie - algehele thermische sensatie significant verklaard door lokale thermische sensatie

	Co-variaat significantie (p)	Correlatie ( $R^2$ )	Correlatie significantie (p)
Thermische sensatie distaal	0.000	0.624	0.001
Thermische sensatie proximaal	0.000	0.415	0.016
Thermische sensatie hoofd	0.000	0.370	0.031
Thermische sensatie voet	0.001	0.446	0.009
Thermische sensatie hand	0.000	0.496	0.004

#### ALGEGELE THERMISCHE SENSATIE VERKLAARD DOOR HUIDTEMPERATUREN

Uit tabel 14 blijkt dat de distale huidtemperatuur, de huidtemperatuur van de voet, het verschil tussen de proximale en distale huidtemperaturen en het verschil tussen de distale en de gemiddelde huidtemperatuur significante algehele thermische sensatie verklaren. De correlatie van deze huidtemperaturen met de algehele thermische sensatie is laag en niet significant.

**Tabel 14** Significantie en correlatie –algehele thermische sensatie significant verklaard door huidtemperaturen

	Co-variaat significantie (p)	Correlatie ( $R^2$ )	Correlatie significantie (p)
Huidtemperatuur distaal	0.030	0.204	0.222
Huidtemperatuur voet	0.026	0.215	0.198
Vershil huidtemperatuur proximaal en distaal	0.034	-0.215	0.198
Vershil huidtemperatuur gemiddeld en distaal	0.020	-0.212	0.215

#### ALGEGELE THERMISCHE SENSATIE VERKLAARD DOOR OMGEVINGSCONDITIES

Uit tabel 15 blijkt dat alleen tocht een significante ( $p < 0.034$ ) verklarende omgevingsconditie is voor de algehele thermische sensatie. Tocht is een combinatie van meerdere omgevingscondities, waardoor er geen correlatiecoëfficiënt bepaald kan worden.

**Tabel 15** Significantie en correlatie – algehele thermische sensatie significant verklaard door omgevingscondities

	Co-variaat significantie (p)	Correlatie ( $R^2$ )	Correlatie significantie (p)
Tocht*	0.034	-	-

\* combinatie van luchttemperatuur, lichtsnelheid en turbulentie-intensiteit

#### LOKALE THERMISCHE SENSATIE VERKLAARD DOOR HUIDTEMPERATUREN

In tabel 16 blijkt dat alleen 38% van de variantie van de thermische sensatie van de voeten significant verklaard kan worden door de huidtemperatuur van de voet.

**Tabel 16** Significantie en correlatie –lokale thermische sensatie significant verklaard door huidtemperaturen

	Co-variaat significantie (p)	Correlatie ( $R^2$ )	Correlatie significantie (p)
Thermische sensatie voeten   Huidtemperatuur voeten	0.060	0.383	0.020

**LOKALE THERMISCHE SENSATIE VERKLAARD DOOR OMGEVINGSCONDITIES**

Uit tabel 17 blijkt dat alleen de distale thermische sensatie significant ( $p < 0.049$ ) verklaard kan worden door de turbulentie-intensiteit. Uit de toetsing met Kendall's tau blijkt dat 47% van de variantie van de distale thermische sensatie significant ( $p < 0.005$ ) verklaard kan worden door turbulentie-intensiteit en 33% door de luchttemperatuur ( $p < 0.047$ ). De variantie van de thermische sensatie van de handen kan voor 39% significant ( $p < 0.019$ ) verklaard worden door de luchttemperatuur en voor 32% significant ( $p < 0.050$ ) door de turbulentie-intensiteit.

**Tabel 17** Significantie en correlatie –lokale thermische sensatie significant verklaard door omgevingscondities

		Co-variaat significantie (p)	Correlatie ( $R^2$ )	Correlatie significantie (p)
Distale thermische sensatie	Luchttemperatuur	0.106	0.329	0.047
	Turbulentie-intensiteit	0.049	-0.467	0.005
Thermische sensatie handen	Luchttemperatuur	0.041	0.389	0.019
	Turbulentie-intensiteit	0.369	-0.323	0.050

**ALGEEHEL THERMISCH COMFORT VERKLAARD DOOR OMGEVINGSCONDITIES**

De verticale temperatuurgradiënt is een significant ( $p < 0.044$ ) verklarende omgevingsconditie is voor het algeheel thermisch comfort, maar er is geen correlatie gevonden tussen de verticale temperatuurgradiënt en het algeheel thermisch comfort, zie tabel 18.

**Tabel 18** Significantie en correlatie –algeheel thermisch comfort significant verklaard door omgevingscondities

	Co-variaat significantie (p)	Correlatie ( $R^2$ )	Correlatie significantie (p)
Verticale temperatuur gradiënt	0.038	0.080	0.669

**LOKAAL THERMISCH COMFORT VERKLAARD DOOR OMGEVINGSCONDITIES**

De luchttemperatuur op 0.6 en 1.1m hoogte is een significante verklarende variabele van het proximale thermisch comfort ( $p < 0.007$ ), het thermisch comfort van het hoofd ( $p < 0.025$ ), de linkerhand ( $p < 0.049$ ), de rechterhand ( $p < 0.030$ ) en de linkervoet ( $p < 0.006$ ), zie tabel 19. Het thermisch comfort van de rechter voeten kunnen significant verklaard worden met de turbulentie-intensiteit ( $p < 0.038$ ) en de lichtsnelheid ( $p < 0.004$ ). 48% van de variantie van het thermisch comfort van de linkerhand en 37% van de rechterhand kan verklaard worden met de luchttemperatuur. Uit de analyse met Kendall's tau blijkt ook dat 50% van de variantie van het thermisch comfort van de linkerhand en 36% van het thermisch comfort aan de rechterhand verklaard kan worden met behulp van de turbulentie-intensiteit.

**Tabel 19** Significantie en correlatie –lokaal thermisch comfort significant verklaard door omgevingscondities

		Co-variaat significantie (p)	Correlatie ( $R^2$ )	Correlatie significantie (p)
Proximaal thermisch comfort	Luchttemperatuur	0.004	0.022	0.908
Thermisch comfort hoofd	Luchttemperatuur	0.014	-0.153	0.413
Thermisch comfort linker hand	Luchttemperatuur	0.046	-0.483	0.008
	Turbulentie-intensiteit	0.229	0.506	0.005
Thermisch comfort rechter hand	Luchttemperatuur	0.030	-0.37	0.042
	Turbulentie-intensiteit	0.230	0.358	0.046
Thermisch comfort linker voet	Luchttemperatuur	0.198	-0.350	0.053

LOKAAL THERMISCH COMFORT VERKLAARD DOOR HUIDTEMPERATUREN

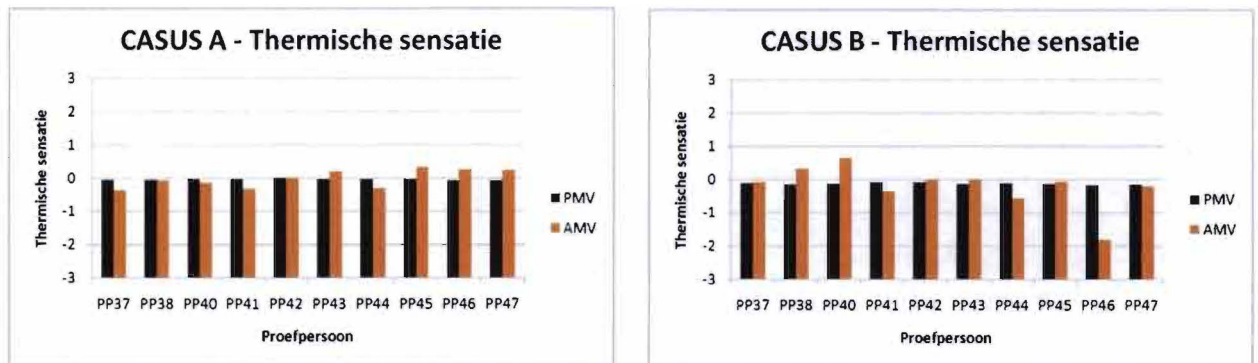
De proximale huidtemperatuur verklaart het proximale thermisch comfort significant ( $p < 0.011$ ), zie tabel 20. Ook blijkt dat de afname van de huidtemperatuur van de hand tussen T1 en T4 significant het thermisch comfort van de hand ( $p < 0.02$ ) verklaart.

**Tabel 20** Significantie en correlatie –lokale thermisch comfort significant verklaard door huidtemperaturen

		Co-variant significantie (p)	Correlatie ( $R^2$ )	Correlatie significantie (p)
Proximaal thermisch comfort	Proximale huidtemperatuur	0.011	-0.129	0.486
Thermisch comfort hand	Handtemperatuur gradiënt T1 en T4	0.02	-0.156	0.389

**2.2.5. Relatie tussen proefpersoononderzoek en NEN-EN-ISO 7730**

De verschillen tussen de AMV en de PMV van casus A en casus B zijn te zien in figuur 22. Bij beide casussen ligt voor iedere proefpersoon de PMV tussen de 0 en -0.1. De AMV daarentegen ligt bij de meeste proefpersonen tussen de -0.5 en 0.5. Alleen bij casus B neemt de AMV extremere waarden aan, namelijk bij PP40, PP44 en PP46.



**Figuur 22** Thermische sensatie bij PMV en AMV voor casus A en casus B

**2.3. DISCUSSIE**

De opzet van de casussen was een inblaastemperatuur  $\geq 16.8^\circ\text{C}$  met een oppervlaktetemperaturen van  $21.6^\circ\text{C}$  of wandtemperaturen van  $20.1^\circ\text{C}$  met een vloertemperatuur van  $25.2^\circ\text{C}$ . De niet-uniformiteit in deze casussen hebben geen thermisch comfortklachten veroorzaakt en er zijn er geen significante verschillen gemeten tussen de AMV en de PMV.

De verschillen tussen de casussen hebben geen grote verschillen in fysiologische responsies veroorzaakt thermisch comfort veroorzaakt. Het is daarom interessant om meer proefpersoononderzoeken te doen naar thermisch comfort en fysiologisch respons bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem met een lage inblaastemperatuur, bijvoorbeeld  $5^\circ\text{C}$ .

Het proefpersoononderzoek is uitgevoerd met 10 gezonde mannen tussen de 20 en 30 jaar. De gevonden thermofysiologische responsies en thermisch comfort beoordelingen kunnen afhankelijk zijn geweest door deze selectie en om de resultaten naar een grote groep te kunnen generaliseren zouden bijvoorbeeld ook vrouwen en oudere mannen onderzocht moeten worden.



Het thermisch comfort bij natuurlijke ventilatie in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem is per casus beoordeeld over een periode van 2 uur, terwijl in de praktijk mensen voor langere tijd blootgesteld worden aan een thermisch klimaat. Ook is gebleken dat thermisch comfort anders beoordeeld wordt tijdens klimaatkameronderzoeken dan in de praktijk (Kurvers et al., 2002). Bij het interpreteren van de resultaten moet hier dus rekening mee gehouden worden.

De distale huidtemperaturen van Casus A en Casus B zijn significant lager ( $p < 0.007$ ) dan de proximale huidtemperaturen. De proximale thermische sensatie is over het algemeen veel gevoeliger voor lagere huidtemperaturen (Nakamura et al., 2008) dan de distale thermische sensatie. Het verschil tussen de individuele proximale en distale huidtemperaturen blijkt groot genoeg te zijn om bij Casus B een significant verschil ( $p < 0.013$ ) in lokale thermische sensatie te veroorzaken.

Gevonden relaties volgen uit een statistische analyse met linear mixed model en Kendall's tau, echter geen van beide modellen zijn volledig geschikt voor de analyse. Linear mixed model is alleen geschikt voor parametrische datasets en Kendall's tau is een methode die geen correctie uitvoert voor de proefpersonen als individu. De verkregen conclusies moeten hierdoor met enige voorzichtigheid betracht worden.

Het onderzoek bestaat uit herhaalde metingen. Zowel binnen een casus (meerdere vragenlijsten), als het blootstellen van dezelfde proefpersonen aan twee casussen. Met behulp van Kendall's tau kan er een correlatie aangetoond worden tussen meerdere variabelen, maar niet welke invloed een onafhankelijke variabele op de afhankelijke variabele heeft. Hiervoor is namelijk een regressieanalyse nodig. Voor het gebruik van lineaire of meervoudige regressieanalyse kan slechts één set metingen, bijvoorbeeld casus A, T4 gebruikt worden. Dit betekent dat het resultaat van slechts 10 proefpersonen gebruikt kan worden om een causaal verband aan te tonen. In tabel 21 zijn resultaten te vinden uit de lineair en meervoudige regressie analyse gebaseerd op gevonden significante relaties met lineair mixed models. Uit deze vergelijking blijkt dat alleen de distale huidtemperatuur van Casus B de algehele thermische sensatie significant kan verklaren. Doordat het resultaat van 10 metingen meegenomen wordt lijkt het alsof er geen verband is, terwijl met lineair mixed models deze relaties wel aangetoond kunnen worden. Een onderschatting van het aantal proefpersonen kan er namelijk toe leiden dat een werkelijk effect niet door de studie gedetecteerd wordt of de studie zal tot foute conclusies leiden (Ellis, 2010). Door dit onderzoek te herhalen kan onderzocht worden of er met behulp van lineaire / meervoudige regressie analyse relaties te vinden zijn tussen de thermische sensatie en bijvoorbeeld distale huidtemperaturen in combinatie met tochtklachten

**Tabel 21** Resultaten lineaire/meervoudige regressie analyse

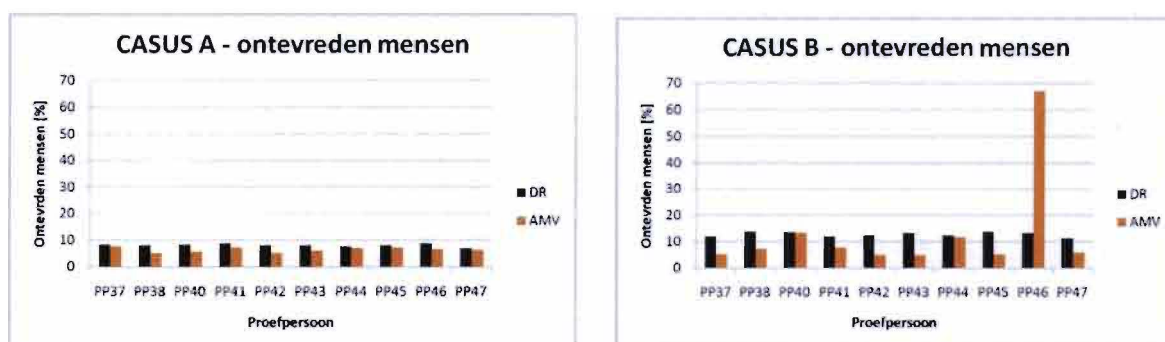
	Algehele thermische sensatie voorspeld door de distale huidtemperatuur		Algehele thermische sensatie voorspeld door combinatie van luchttemperatuur, turbulentie-intensiteit en luchtsnelheid	
	Casus A T4	Casus B T4	Casus A T4	Casus B T4
Significantie	$p(<0.791)$	$p(<0.014)$	$p(<0.275)$	$p(<0.277)$
R <sup>2</sup>	0.009	0.491	0.452	0.450

Uit het onderzoek van Van Oeffelen (2007) blijkt dat de temperatuurgradiënt tussen onderarm en vingertop een verklarende parameter is voor de algehele thermische sensatie. In dit onderzoek is deze temperatuurgradiënt geen significant ( $p > 0.059$ ) verklarende parameter voor de algehele thermische sensatie en het geheel comfort ( $p > 0.961$ ). Door het onderzoeken van een grotere groep proefpersonen is het mogelijk dat er wel significante relaties gevonden worden.

Volgens Zhang et al. (2010) en Wang et al. (2007) hebben thermisch comfortklachten in gebouwen hoofdzakelijk betrekking op de lichaamsdelen die niet bedekt zijn, zoals de nek, het hoofd, de handen en de enkels. Uit het onderzoek van Van Oeffelen (2007) blijkt dat de huidtemperatuur van de hand en de enkel een bijdrage kunnen leveren aan de voorspelling van de algehele thermische sensatie. Dit komt overeen met de gevonden significante relatie tussen de distale huidtemperatuur en de algehele thermische sensatie. Volgens Hardy (1970), Nilsson (2004), Zhang et al. (2009) wordt de algehele thermische sensatie beïnvloed door het verschil tussen koude en warme lichaamsdelen, terwijl volgens Nilsson (2004) en Zhang et al. (2010) de lokale huidtemperatuur ten opzichte van de gemiddelde huidtemperatuur invloed heeft op de algehele thermische sensatie. Uit dit onderzoek blijkt dat met de gradiënt tussen proximale en distale huidtemperaturen de algehele thermische sensatie significant verklaard kan worden. Maar ook met de gradiënt tussen de distale en de gemiddelde huidtemperatuur. Hieruit blijkt dus dat de algehele thermische sensatie significant verklaard kan worden door zowel de extremiteiten als de niet-uniforme verdeling van de huidtemperaturen over het lichaam. Dit komt ook overeen met de theorie van Nilsson (2004) voor het beoordelen van de invloed van de lokale thermische ten opzichte van de algehele thermische sensatie op het thermisch comfort in de ruimte. Op deze theorie is Comfort Zones Diagram gebaseerd, waardoor dit een model met potentie kan zijn.

Hoewel volgens Van Oeffelen (2007) en Hellwig et al. de PMV geen goede voorspeller is van de algehele thermische sensatie blijkt uit het proefpersoononderzoek dat bij een inblaastemperatuur  $\geq 16.8^{\circ}\text{C}$  de Actual Mean Vote (AMV) binnen de verwachtingen valt van de PMV. De AMV is verschillend van de PMV, maar dit verschil is zowel voor casus A als casus B niet significant. De AMV beoordelingen vallen binnen de range  $-0.5 \leq \text{PMV} \leq 0.5$  (klimaatklasse B) en worden over het algemeen als acceptabel beschouwd.

Tocht is als enige van de omgevingscondities een significant verklarende parameter van de algehele thermische sensatie. De DR voorspelt een hoger percentage ontevreden dan op basis van de AMV (omgerekend naar een PPD) verwacht mag worden, zie figuur 23. Het zou dus kunnen dat het percentage ontevreden mensen als gevolg van tocht in niet-uniforme omgevingen lager is. Deze vergelijking is een eerste aanzet om tochtklachten te kunnen beoordelen in gecombineerde niet-uniforme omgevingen, maar het is de vraag of dit de meest geschikte methode is. Een koude algehele thermische sensatie beoordeling hoeft niet direct te betekenen dat dit zorgt voor een bepaald percentage ontevreden als gevolg van tocht. Daarom moet er meer onderzoek komen naar het beoordelen van het aantal ontevreden mensen als gevolg van tocht in niet-uniforme omgevingen.



**Figuur 23** Ontevredenheid behorend bij DR en AMV

De opzet van dit onderzoek ging uit van veel voorkomende waarden voor de wand-, plafond- en de vloertemperatuur in goed geïsoleerde gebouwen. Het aantal ontevreden als gevolg van verticale temperatuurgradiënt, stralingstemperatuurasymmetrie en de vloertemperatuur is hierdoor ook laag. Uit het proefpersoononderzoek is ook gebleken dat deze condities geen significante relatie hebben met de algehele

thermische sensatie. Het is dus de vraag of stralingstemperatuurasymmetrieën, temperatuurgradiënten en vloertemperaturen in de praktijk voor kunnen komen in goed geïsoleerde gebouwen die groot genoeg zijn om invloed te kunnen uitoefenen op de thermische sensatie.

## 2.4. CONCLUSIE

In deze paragraaf wordt een antwoord gegeven op de verschillende onderzoeksvragen.

### 1. Welke thermofysiologische en fysische parameters hebben een significante relatie met de thermische sensatie en het thermisch comfort bij een situatie met natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem?

De lokale thermische sensatie van alle lichaamsdelen heeft een significante relatie met de algehele thermische sensatie, daarentegen kan het algeheel thermisch comfort niet verklaard worden aan de hand van het lokaal thermisch comfort.

De huidtemperaturen hebben geen significante invloed op de lokale thermische sensatie, maar de distale huidtemperatuur heeft wel een significante relatie met de algehele thermische sensatie. Ook de niet-uniforme verdeling van de huidtemperaturen over het lichaam zijn van invloed gebleken. Het verschil tussen proximaal en distaal en het verschil tussen distaal en gemiddeld hebben een significante relatie met de algehele thermische sensatie.

Tocht is als enige van de omgevingscondities een significant verklarende parameter van de algehele thermische sensatie, terwijl de distale thermische sensatie significant verklaard kan worden door de luchttemperatuur. Voor het verbeteren van de algehele thermische sensatie bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem is het dus noodzakelijk om tochtklachten in een ruimte weg te nemen en voor een oplossing te kiezen waarbij de afkoeling van de distale huidtemperaturen beperkt blijft.

### 2. Wat is de invloed van gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities op het thermisch comfort, de thermische sensatie en de thermofysiologische responsies in een situatie met natuurlijke ventilatie in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem?

Hoewel er geen significante verschillen in thermisch comfort of thermische sensatie tussen enkelvoudige en gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities zijn, blijkt wel dat er significante verschillen zijn in distale huidtemperatuur. Deze verschillen zijn verklaarbaar doordat er verschillende temperaturen op de wanden, de vloer en het plafond opgelegd zijn en doordat er met verschillende temperaturen ingeblazen is. Hierdoor ontstaan er significante lokale verschillen in bijvoorbeeld luchttemperatuur, luchtsnelheid en turbulentie-intensiteit, die zijn invloed hebben gehad op de distale huidtemperatuur.

### 3. Hoe kan de thermische sensatie het best voorspeld worden bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem?

Tijdens het proefpersoononderzoek is de PMV een goede voorspeller geweest van de algehele thermische sensatie (inblaasttemperatuur  $\geq 16.5^{\circ}\text{C}$ ).



## HOOFDSTUK 3

### CFD: KALIBRATIE EN VARIANTENSTUDIE

Het voorspellen van lucht- en warmtestromingen bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem heeft als doel om meer inzicht te krijgen in de niet-uniformiteit van de omgeving onder verschillende omgevingscondities. De resultaten van de CFD-simulaties worden ook gebruikt als directe invoer van het thermofysiologische model ThermoSEM (Van Marken Lichtenbelt et al., 2007) en als indirecte invoer van Comfort Zones Diagram (Nilsson, 2004). Hierdoor kan er uiteindelijk meer inzicht verkregen worden in de thermofysiologische responsies en de thermische sensatie onder niet-uniforme omgevingscondities.

Dit hoofdstuk gaat in op methode van de kalibratiemetingen en op de methode van de kalibratiesimulaties met CFD om vervolgens een variantenstudie te doen waarbij de resultaten besproken worden.

#### 3.1. METHODE VOOR DE KALIBRATIEMETINGEN

Het verkrijgen van een goede overeenkomst tussen empirische data van optredende lichtsnelheden en luchttemperaturen in de thermofysiologische onderzoeksruimte en de gesimuleerde lichtsnelheden en luchttemperaturen in een CFD-model is essentieel voor het uitvoeren van een betrouwbare variantenstudie met behulp van CFD. Daarom wordt er een kalibratiestudie uitgevoerd met verschillende softwarematige instellingen alvorens de varianten gesimuleerd gaan worden. In deze paragraaf worden de kalibratiemetingen toegelicht, beginnend met casussen, gevolgd door de meetinstrumenten en het meetraster.

##### 3.1.1. Casussen

De kalibratiemetingen zijn uitgevoerd met twee casussen, namelijk de Casus A en Casus B, zie tabel 22. Er zijn randvoorwaarden opgelegd voor de inblaasttemperatuur, de inblaassnelheid, de oppervlaktetemperaturen en voor de thermische manikin "MaLo" (Loomans, 1997). Tijdens het proefpersoononderzoek is er een laptop in de ruimte aanwezig geweest en deze is ook terug te vinden in het CFD-model. De kalibratiemetingen zijn zonder laptop uitgevoerd en om het verschil in vermogen tussen de kalibratiemetingen en de CFD-simulaties te compenseren is het vermogen van Malo vastgesteld op 135 W (20 W voor de laptop en 115 W voor een persoon met een metabolisme van 1.2 met). In de ruimte bevindt zich ook tl-verlichting en de warmtestroom hiervan is 200 W, zie in tabel 22. De inlaatsnelheid is geschat op 1.2 m/s en de metingen zijn verricht onder de minimaal mogelijke inblaasttemperaturen.

**Tabel 22** Casussen voor natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem

	Casus A	Casus B
Vloertemperatuur	21.5°C	25°C
Wand- en plafondtemperatuur	21.5°C	20°C
Inblaasttemperatuur	Minimaal mogelijk (17.5°C)	Minimaal mogelijk (16.8°C)
Inlaatsnelheid	1.2 m/s	1.2 m/s
Warmtestroom MaLo	135 W	135 W
Warmtestroom verlichting	200 W	200 W

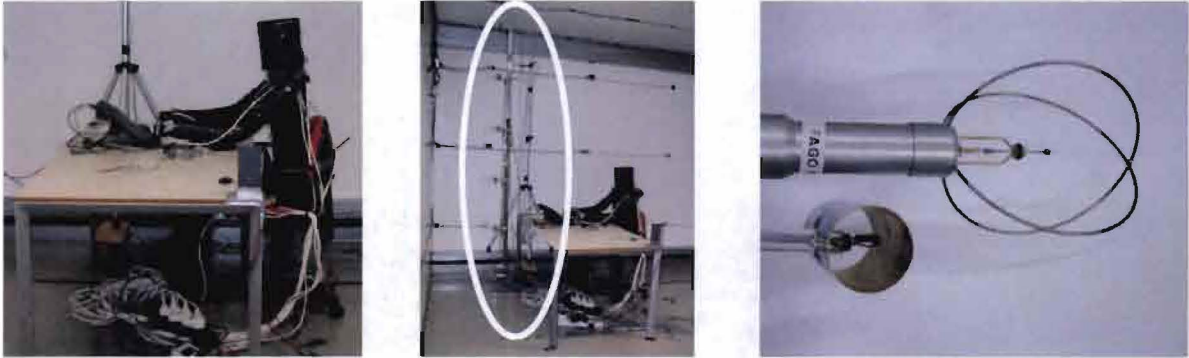
**3.1.2. Meetinstrumenten & thermofysiologische onderzoeksruimte**

Voor het kalibreren van het CFD-model worden de luchtsnelheid (Dantec), de luchttemperatuur (NTC) en de oppervlaktetemperatuur (NTC) gemeten. Meer informatie over de meetapparatuur en de nauwkeurigheid is te vinden in bijlage 2. De metingen vinden plaats in de thermofysiologische onderzoeksruimte, zie bijlage 1.

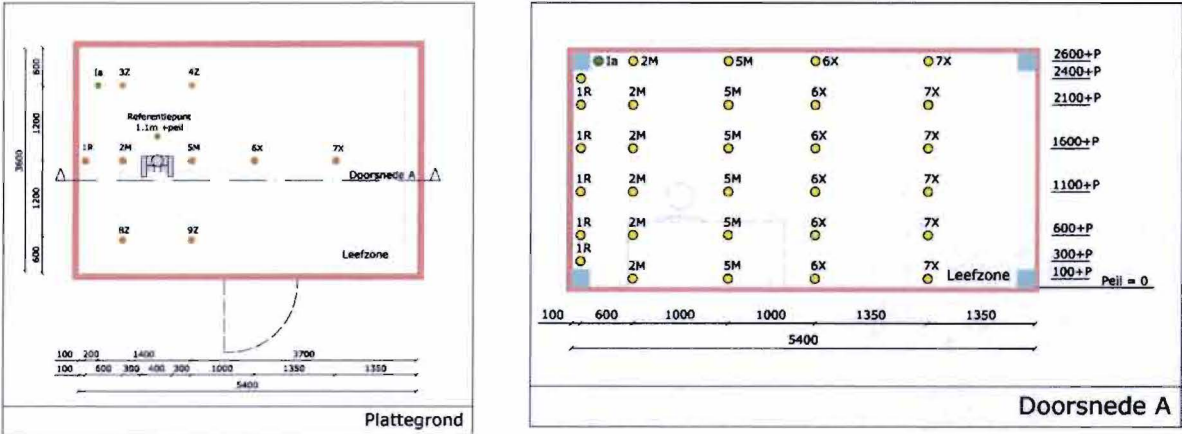
**3.1.3. Meetraster**

De kalibratiemetingen zijn uitgevoerd op drie meetrasters, zie figuur 25. Er wordt verwacht dat de worp van de ventilatielucht in de buurt van de thermische manikin (figuur 24) terecht komt, waardoor de luchtsnelheid en de luchttemperatuur van plaats tot plaats meer kunnen verschillen dan elders in de ruimte. Dit gebied heeft daarom een verhoogde dichtheid aan meetposities.

Op de meetposities in figuur 25 (plattegrond), wordt het meetstatief met luchtsnelheids- en -temperatuursensoren geplaatst, die op diverse hoogtes de condities kunnen meten, zie figuur 25 doorsnede. De positionering van de sensoren op het statief komt overeen met de meethoogtes voor zittende mensen, conform NEN-EN-ISO 7726. Dit zijn de enkelhoogte (0.1m), de dijhoogte (0.6m) en de nekhoogte ( 1.1m). De hart-op-hart afstand van deze meetpunten is 0.5m; deze afstandsmaat is ook aangehouden tussen de overige meetpunten op het statief, zie figuur 25. De hoogte tussen de ventilatieboxen is afwijkend ten opzichte van de rest van de ruimte, waardoor de verdeling van de sensoren op deze positie afwijkend is, zie figuur 25. Iedere meetpositie wordt individueel gemeten met hetzelfde statief, waardoor het statief tijdens het meten van een casus verzet moet worden. Hierdoor wordt de luchtstroming verstoord; daarom is er een stabilisatieperiode van 10 minuten aangehouden bij een meetperiode van 5 minuten (Loomans, 1998).



**Figuur 24** v.l.n.r. MaLo, statief, bovenaanzicht luchtsnelheidsensor (boven) en luchttemperatuur sensor (onder)



**Figuur 25** Positionering en benaming meetpunten ten behoeve van kalibratiemetingen. .

#### MEETPUNT VOOR DE INLAAT

De stabiliteit van de inblaastemperatuur en –snelheid wordt gemeten op positie 1a, zie figuur 25. De Dantec meet de inlaatsnelheid op 4 cm van de inlaat (in verband met een beschermingskap), terwijl de NTC (zonder stralingskap) de temperatuur op 2cm van de inlaat meet. Door deze afstanden kan de inlaatlucht zich mengen met de ruimtelucht, waardoor de gemeten inlaatsnelheid en –temperatuur kunnen afwijken van de feitelijk karakteristieken. Met behulp van een handmeter is daarom de inlaatsnelheid en –temperatuur nagemeten. Uit beide metingen blijkt dat de inblaassnelheid 1.2 m/s is.

#### REFERENTIEPUNT

De condities dienen in de ruimte tijdens iedere meting gelijk te zijn. Om dit te controleren is er een referentiepunt gedefinieerd waarop de luchtsnelheid en luchttemperatuur op 1.1m hoogte tijdens de hele meetsessie gemeten wordt.

#### VENTILATIEDEBIET

Om te bepalen hoeveel lucht er de ruimte in wordt geblazen zijn metingen uitgevoerd om het ventilatievoud of ventilatiedebit te bepalen. Het ventilatievoud is bepaald aan de hand van de afname van geïnjecteerd SF<sub>6</sub>-gas in de tijd. Het ventilatiedebit is bepaald met behulp van een FlowFinder en een Pitot-buis. Daarnaast is het ventilatiedebit berekend aan de hand van de gemeten inblaassnelheid en de ventilatievoud meting, zie tabel 23. Uit de metingen blijkt dat geen enkel ventilatiedebit te verifiëren is met de overige metingen. Zowel met de Dantec als de handmeter is er een inblaassnelheid gemeten van 1.2 m/s. Aangezien de inblaassnelheid invloed heeft op de weg die de worp van de ventilatielucht aflegt, wordt het daaruit voortkomende ventilatiedebit aangehouden voor de kalibratiesimulaties.

**Tabel 23** Gemeten en berekend ventilatiedebit tijdens kalibratiemetingen

	Ventilatiedebit [dm <sup>3</sup> /s]	Ventilatievoud [h]	Inblaassnelheid [m/s]
Dantec	43.2*	-	1.2
FlowFinder	20	-	-
Pitotbuis	27.8	-	-
SF <sub>6</sub> -gas	58.3*	4	-

\* ventilatiedebit bepaald vanuit een gemeten ventilatievoud of inblaassnelheid

## 3.2. METHODE VOOR CFD-SIMULATIES

In deze paragraaf worden de casussen voor de variantenstudie gepresenteerd, wordt het CFD-model besproken en worden onderdelen uit de kalibratiestudie uiteengezet.

### 3.2.1. Casussen kalibratie en variantenstudie

De kalibratiesimulaties vinden plaats met de randvoorwaarden Casus B, zie tabel 24, omdat hier de niet-uniformiteit het grootst is bleken. Door instabiele inblaassnelheden tijdens Casus A en meetpositie 2M, zie bijlage 8, van Casus B is de hieruit voortkomende data niet geschikt als kalibratiedata. De simulatiedata wordt met de kalibratiedata vergeleken op meetpositie 5M, zie figuur 26, 27, 28, omdat hier de invloed van de worp het meest zichtbaar is. Er wordt gekalibreerd op het type turbulentie model, de ‘turbulence length scale’ en op de convectieve warmteoverdracht van de vloer. De kalibratiesimulatie is acceptabel wanneer de trend van de karakteristieken het meest overeenkomt met de meetresultaten (Jiang, 2009) en de afwijkingen in absolute waarden beperkt zijn.

De CFD-simulaties worden beoordeeld op de volgende convergentiecriteria (Loomans, 1998):

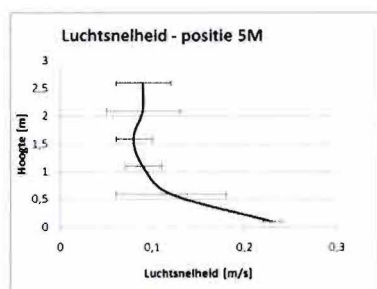
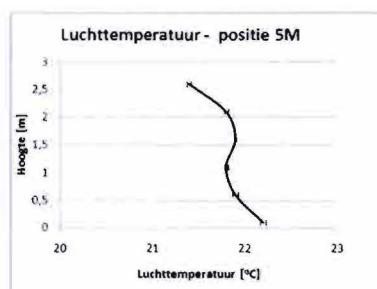
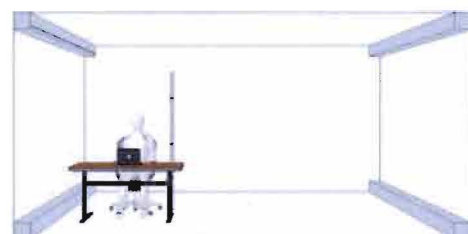
- De wet van behoud van energie moet in balans zijn;

- De residuen van de behoudsvergelijkingen moeten de opgelegde criteria zo goed mogelijk halen;
  - Voor continuïteit, x-, y-, en z-snelheid, k en epsilon zijn de convergentiecriteria voor de residuen  $10^{-3}$  en voor de energie  $10^{-6}$  (Fluent inc., 2006).
- Veranderingen in absolute waarden voor luchtsnelheid en luchttemperatuur moeten klein zijn.

**Tabel 24** CFD-invoer van de variantenstudie m.b.t. 'boundary-conditions'

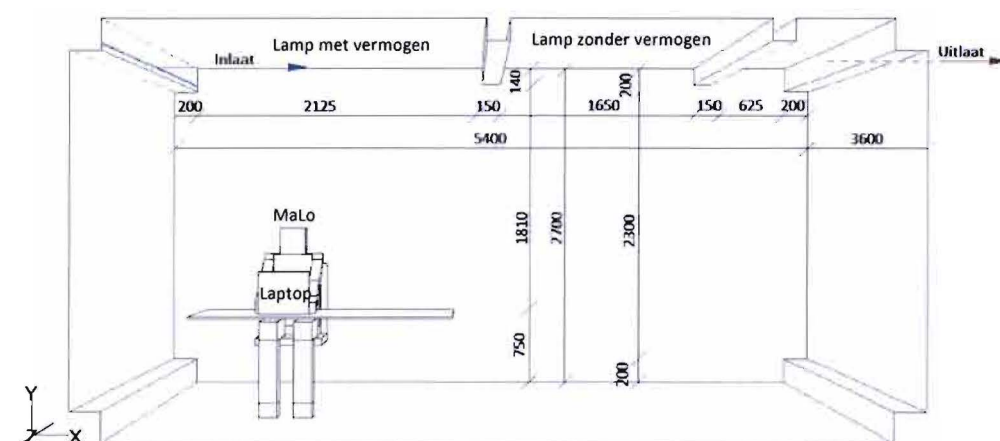
	Casus A	Casus B	Casus C	Casus D	Casus E	Casus F
Vloertemperatuur	21.6°C	25.2°C	23.0°C	25.2°C	27.2°C	25.2°C
Wand- & plafondtemperatuur	21.6°C	20.1°C	23.0°C	21.1°C	20.1°C	23.0°C
Inblaastemperatuur	17.5°C	16.8°C	5.0°C	5.0°C	5.0°C	-10.0°C
Inblaassnelheid	1.2 m/s	1.2 m/s	1.2 m/s	1.2 m/s	1.2 m/s	1.2 m/s
Warmtestroom MaLo	57.6 W *	57.6 W *	57.6 W *	57.6 W *	57.6 W *	57.6 W *
Warmtestroom verlichting	100 W *	100 W *	100 W *	100 W *	100 W *	100 W *
Warmtestroom Laptop	10 W *	10 W *	10 W *	10 W *	10 W *	10 W *

\* Warmtestroom is afkomstig van de ingevoerde warmtestroomdichtheid voor convectie

**Figuur 26** Luchtsnelheid positie 5M**Figuur 27** Luchttemperatuur positie 5M**Figuur 28** Visualisatie positie 5M

### 3.2.2. Rekendomein

Het rekendomein representeert de thermofysiologische onderzoeksruimte (lxbxh=5.4x3.6x2.7m). De inlaat (0.01x3.6m) bevindt zich aan de linkerkant en de uitlaat (0.2x3.6m) aan de rechterkant van de onderzoeksruimte in figuur 29. In de ruimte is de thermische manikin "MaLo" aanwezig, die vereenvoudigd is tot een blokvormig model. De laptop, tafel en stoel zijn vereenvoudigd tot de vlakken die de lucht- en warmtestroming mogelijk kunnen beïnvloeden, zie figuur 29. De lampen zijn vereenvoudigd naar balken die over de volledige diepte van de ruimte gepositioneerd zijn.

**Figuur 29** Het driedimensionale rekendomein met maatvoering

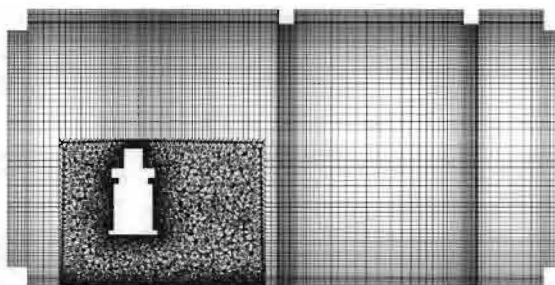


### 3.2.3. Rekenraster

Het doel van het rekenraster is de discretisatie van de geometrie, zodat de stroming in de ruimte met een bepaalde kwaliteit en betrouwbaarheid gegenereerd kan worden. De opbouw van dit raster is hierbij van groot belang. Zo mogen aan elkaar grenzende cellen niet te veel van elkaar verschillen in grootte (bij voorkeur een maximale verhouding van 1.3 (Franke et al., 2007)). Ook geldt: hoe fijner het raster, hoe nauwkeuriger de stroming berekend kan worden. Het raster is gegenereerd naar een voorbeeld van Sørensen et al. (2004). Rondom de thermische manikin bevindt zich een kubus met ongestructureerd raster en de rest van de ruimte bestaat uit een gestructureerd raster, zie figuur 30 en 31. Het gebied rond de inlaat en rond MaLo zijn belangrijke gebieden, waar plaatselijk grotere verschillen in de lucht- en warmtestroming kunnen ontstaan. In deze gebieden bevinden zich dan ook fijnere cellen dan in de overige gebieden in de ruimte.



**Figuur 30** Het driedimensionale rekenraster.

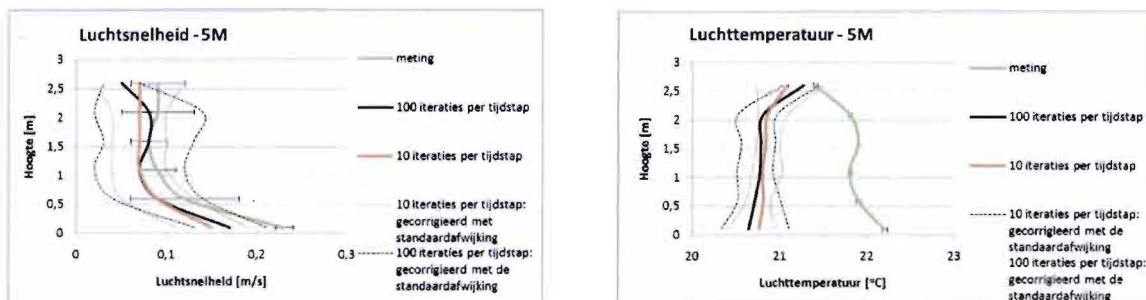


**Figuur 31** Middendoorsnede van het rekenraster.

### 3.2.4. Rekenmethode

In een situatie met natuurlijke ventilatietoevoer in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem treden buoyancy effecten op als gevolg van bijvoorbeeld thermische manikin, verwarmde vloer en laptop of een lage inblaastemperatuur. Deze effecten zijn fysisch gezien complex en simulaties met buoyancy effecten in gesloten ruimtes, zoals de onderzoeksruimte, kunnen instationair worden. Het oplossen van dit soort stromingsvraagstukken kan convergentieproblemen geven wanneer voor een stationaire oplossingsmethode gekozen wordt, zoals (steady) RANS (Hsieh et al., 2003). Daarom wordt door Jiang et al. (2004) voor dit type simulaties een transiënte oplossingsmethode aanbevolen. In dit onderzoek is unsteady-RANS gebruikt.

Timmers (2011) heeft onderzocht dat bij het oplossen van natuurlijke convectie vraagstukken in de tijd weinig verschil bestaat tussen de optredende luchtsnelheden en luchttemperaturen bij tijdstappen van 0.5sec, 1.0 sec, en 1.5sec. De residuen van de behoudsvergelijkingen bij een tijdstap van 1.5sec. komen het minst in de buurt van de opgelegde criteria en een tijdstap van 0.5sec. kost meer rekentijd. Daarom is er gekozen voor een tijdstap van 1.0sec. In figuur 32 wordt een vergelijking gemaakt tussen een situatie met 10 iteraties per tijdstap en een situatie met 100 iteraties per tijdstap. Doordat de Root Mean Square (RMS) van optredende luchtsnelheden en luchttemperaturen tussen de meetdata en een situatie met 10 iteraties per tijdstap of een situatie met 100 iteraties per tijdstap gelijk is wordt er gerekend met 10 iteraties per tijdstap.



**Figuur 32** Vergelijking luchtsnelheid en luchttemperatuur tussen een situatie met 10 en 100 iteraties per tijdstap

### 3.2.5. Turbulentie modellen

In Van Harten (2010) worden verschillende turbulentiemodellen voor RANS-vergelijkingen vergeleken voor binnenklimaat toepassingen. Uit deze vergelijking blijkt dat ieder turbulentiemodel zijn eigen tekortkomingen heeft, maar dat voor een studie met natuurlijke ventilatietoevoer en een laag temperatuur verwarmingsstelsel het RNG-k- $\epsilon$  model en het SST-k- $\omega$  model het meest geschikt is.

### 3.2.6. Wandbehandeling

Stromingen die optreden als gevolg van een verwarmd oppervlak komen tot ontwikkeling in de viskeuze sublaag (Loomans, 1998). Daarom moet deze sublaag bij de verwarmde oppervlakken (lampen, vloer en thermische manikin) goed gemodelleerd worden.

Een RNG - k- $\epsilon$  model is alleen valide voor volledig turbulente stromingen in het veld, maar door het toevoegen van een 'enhanced' wandbehandeling is dit model ook geschikt voor wandgebonden stromingen. Het toepassen van een 'enhanced' wandbehandeling betekent dat de wandaangrenzende cel fijn genoeg moet zijn (bij voorkeur  $y^+ \approx 1$ ). Een hogere  $y^+$  is acceptabel zolang deze in de viskeuze sublaag valt ( $y^+ < 5$ ). Voor het berekenen van de wandgebonden stroming met een SST - k- $\omega$  model wordt aangeraden om dezelfde grid technieken toe te passen als bij een 'enhanced' wandbehandeling (Fluent Inc, 2006).

Uit de CFD-simulaties is gebleken dat de  $y^+$ -waarden van wandaangrenzende cellen bij de vloer binnen een range vallen van  $0 < y^+ < 16$  en dat de wand aangrenzende cellen bij de manikin binnen de range  $0 < y^+ < 14$  vallen. Deze  $y^+$ -waarde kan betekenen dat de convectieve warmtestroming zich niet goed kan ontwikkelen en dat de warmteoverdrachtscoëfficiënten afnemen. Het verbeteren van deze  $y^+$ -waarde betekent dat de wandaangrenzende cellen kleiner moeten worden. Met het toegepaste raster is dit erg gecompliceerd, doordat het verbeteren van de  $y^+$ -waarde afhankelijk is van de overgang tussen het gestructureerde en het ongestructureerd raster. De verdeling van de cellen op deze overgang is namelijk erg gevoelig gebleken voor de realisatie van een ongestructureerd raster met een goede kwaliteit cellen. Een verbetering van de  $y^+$ -waarde is daarom achterwege gelaten.

### 3.2.7. Randvoorwaarden rekenraster

In Fluent kunnen eigenschappen van vlakken worden gedefinieerd door randvoorwaarden op te leggen. Alle vlakken in de ruimte zijn als 'wall' gedefinieerd, met uitzondering van de inlaat ('velocity inlet') en uitlaat (outlet flow).

De vlakken die als 'wall' gedefinieerd zijn kunnen convectieve warmte afgeven door een opgelegde temperatuur of een opgelegde warmtestroomdichtheid. De opgelegde temperaturen of warmtestroomdichtheden zijn bepaald met behulp van een warmtebalansvergelijking gebaseerd op warmteoverdrachtscoëfficiënten uit de norm NEN-EN 15377-1:2008. Deze coëfficiënten zijn geldig voor een combinatie van convectieve en stralingswarmteafgifte en volgens NEN-EN 15377-1:2008 moeten deze gereduceerd worden met  $5.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  om een coëfficiënt te krijgen die alleen geldig is voor convectieve warmteoverdracht. Om te bepalen welke methode voor convectieve warmteafgifte het meest geschikt is voor de wanden, de vloer en het plafond wordt een kalibratiestudie uitgevoerd voor Casus B met een vloertemperatuur van  $25.2^\circ\text{C}$  en een warmtestroomdichtheid van  $12.86 \text{ W/m}^2$ .

De inlaatsnelheid is bij alle casussen  $1.2 \text{ m/s}$  met een turbulentie-intensiteit 5% (gebaseerd op gemeten luchtsnelheden en bepaald conform NEN-EN-ISO 7726) opgelegd. Voor de inlaat van de thermofysiologische onderzoeksruimte bevindt zich een rooster met een maasgrootte van  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ . Door dit rooster neemt het oppervlak van de inlaat af en kan het mogelijk zijn dat de hoeveelheid energie van de toevoerlucht nabij de inlaat toeneemt. Daarom is er een 'turbulence length scale' opgelegd. Dit is een fysische karakteristiek die gerelateerd is aan de grootte van de wervels die bepalend zijn voor de hoeveelheid energie van een stroming

(Fluent Inc., 2006). De ‘turbulence length scale’ bij rechthoekige toevoeren is te berekenen met vergelijking 1. De hydraulische diameter is de verhouding tussen het doorstroomoppervlak en de bevochtigde omtrek en is te berekenen met behulp van vergelijking 2.

$$l = 0.07 D_h \quad [1] \qquad D_h = \frac{4A}{S} \quad [2]$$

$l$  = turbulente lengte schaal [m]  
 $D_h$  = hydraulische diameter [m]  
 $A$  = doorstroomoppervlak [m<sup>2</sup>]  
 $S$  = bevochtigde omtrek [m]

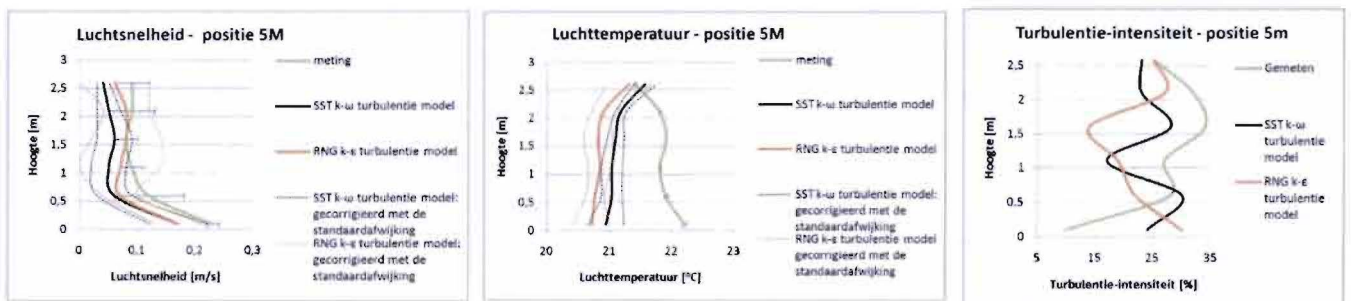
Tijdens een kalibratiestudie wordt bepaald wat de invloed is van de ‘turbulence length scale’. Hiervoor wordt voor het doorstroomoppervlak en de bevochtigde omtrek waarden aangehouden die overeenkomen met de volledige opening van de inlaat (0.01x3.6m) en waarden die overeenkomen met de opening van het kleinste deel van de inlaat (0.01x0.01m) (Fluent Inc., 2006). Dit resulteert in een ‘turbulence length scale’ van respectievelijk 0.0014m en 0.0007m.

### 3.3. KALIBRATIERESULTATEN

De kalibratieresultaten die hier besproken worden hebben betrekking op de kalibratiesimulaties met verschillende turbulentiemodellen, verschillende methoden voor de convectieve warmte afgifte van de vloer en verschillende de ‘turbulence length scales’.

#### 3.3.1. Turbulentiemodel

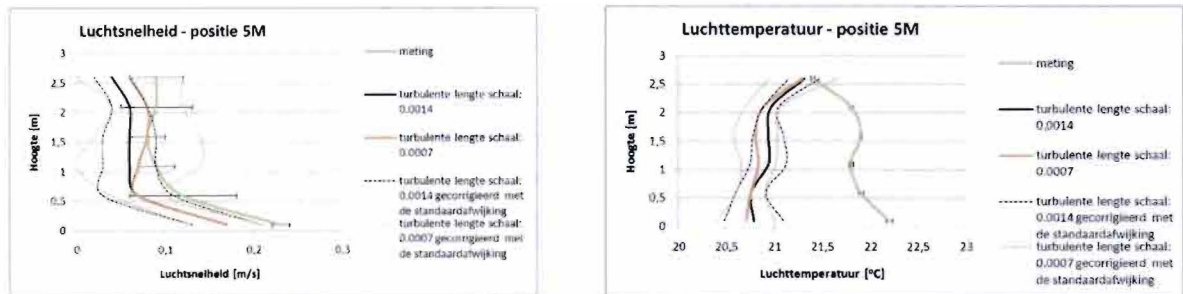
Uit de vergelijking van de simulatieresultaten van beide turbulentiemodellen met de meetdata, zie figuur 33, blijkt dat verschillende waarden berekend worden voor de luchtsnelheid en –temperatuur. Het SST-k- $\omega$  model (RMS=0.8°C) benadert de gemeten luchttemperatuur beter dan het RNG-k- $\epsilon$  model (RMS=1.0°C). De voorspelde luchtsnelheid komt bij beide turbulentiemodellen ook niet overeen met de gemeten luchtsnelheid. Het SST-k- $\omega$  model heeft een RMS van 0.05 m/s, terwijl het RNG-k- $\epsilon$  model een RMS heeft van 0.03 m/s. Ook komt de trend van de luchtsnelheid van het RNG-k- $\epsilon$  model meer overeen met de trend van de meetresultaten. De gesimuleerde turbulentie-intensiteit heeft ook een grote afwijking met het RNG-k- $\epsilon$  model (RMS=20%) en het SST-k- $\omega$  model (RMS=14%). Het RNG-k- $\epsilon$  model wordt als turbulentiemodel toegepast bij de overige kalibratiestudies en de variantenstudie op basis van de beste overeenkomsten tussen de gemeten en de gesimuleerde luchtsnelheid.



**Figuur 33** Vergelijking tussen metingen van luchtsnelheid en –temperatuur en turbulentie-intensiteit met verschillende turbulentiemodellen.

### 3.3.2. Turbulence length scale

Het blijkt dat met een turbulente lengte schaal van 0.0007m (RMS=0.02 m/s) de optredende lichtsnelheden tussen 1.1m en 2.6m hoogte een kleinere afwijking hebben ten opzichte van de metingen dan bij een turbulente lengte schaal van 0.0014m (RMS=0.04 m/s), zie figuur 34. De afwijking ten opzichte van de gemeten luchttemperatuur bij een 'turbulence length scale' van 0.0014m is kleiner (RMS=0.97°C) dan bij 0.0007m (RMS=1.03°C). Daarom wordt een 'turbulence length scale' van 0.007m toegepast.



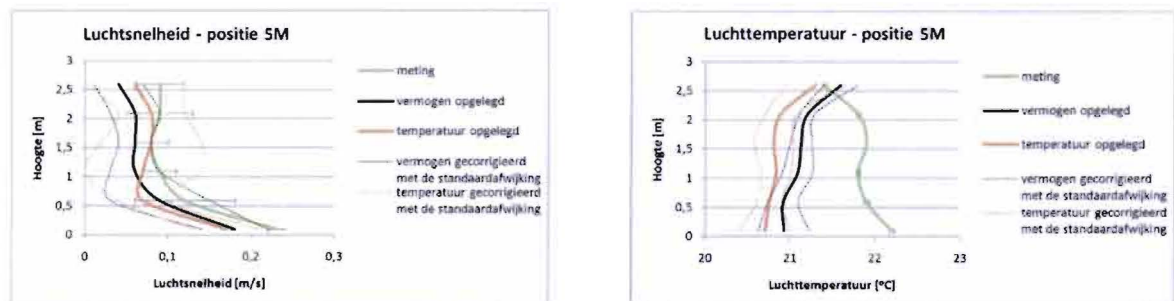
**Figuur 34** Vergelijking tussen metingen van lichtsnelheid en -temperatuur met verschillende turbulentiemodellen.

### 3.3.3. Convectieve warmteafgifte van de vloer

Om te bepalen met welke instellingen de convectieve warmteafgifte van de vloer gesimuleerd kan worden is er een vergelijking gemaakt van een opgelegde vloertemperatuur en een opgelegde warmtestroomdichtheid (conform NEN-EN 15377-1:2008). Het blijkt dat de opgelegde warmtestroomdichtheid een grotere warmtestroom veroorzaakt dan de opgelegde vloertemperatuur, zie tabel 25. De warmtestroomdichtheid is gebaseerd op een  $\Delta T_{(\text{vloer-luchttemperatuur})}$  van 3.7°C, terwijl de warmtestroom afkomstig van de opgelegde vloertemperatuur in de simulatie gebaseerd is op een  $\Delta T_{(\text{vloer-luchttemperatuur})}$  van 4.5°C en dus theoretisch een grotere warmtestroom had moeten veroorzaken. Dit kan betekenen dat de warmteoverdrachtscoëfficiënten in NEN-EN 15377-1:2008 niet dezelfde zijn als in Fluent. Wordt er gekeken naar de invloed van deze warmtestroom op de luchttemperatuur, dan kan geconcludeerd worden dat de luchttemperatuur bij de opgelegde warmtestroomdichtheid een betere benadering geeft van de gemeten luchttemperatuur dan bij de opgelegde vloertemperatuur. Desondanks blijven de verschillen groot tussen de gesimuleerde en gemeten luchttemperatuur, zie figuur 35 en zal bij de overige simulaties een temperatuur op de wanden, het plafond en de vloer worden opgelegd.

**Tabel 25** Warmtestroom bij opgelegde temperatuur of vermogen

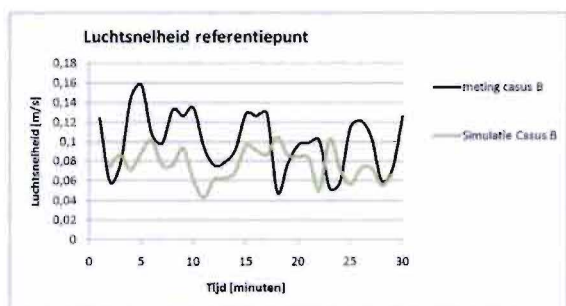
	Temperatuur	Warmtestroomdichtheid
Warmtebron	25.2°C	12.86 W/m <sup>2</sup>
Voorspelde warmtestroom	175 W	231 W



**Figuur 35** Vergelijking tussen metingen van lichtsnelheid en luchttemperatuur in de ruimte en verschillende instellingen voor de convectieve warmte afgifte van de vloer met CFD.

### 3.3.4. Fluctuaties in de tijd

In figuur 36 is de luchtsnelheid gepresenteerd die gemeten is op het referentiepunt tijdens de volledige duur van de kalibratiemeting van Casus B. Hieruit blijkt dat de luchtsnelheidsfluctuaties een duur hebben van 5 tot 10 minuten, terwijl de meetperiode 5 minuten bedroeg. In de vergelijking met de simulatieresultaten blijkt dat de gesimuleerde fluctuaties een duur hebben van ongeveer 2 minuten. In tabel 26 is de errorbar te zien tussen de gemeten en de gesimuleerde luchtsnelheidsfluctuaties. Hieruit blijkt dat er tijdens de meting extremere fluctuaties voorkomen dan tijdens de simulatie, maar dat de standaardafwijking van de metingen en de simulaties dicht bij elkaar liggen.



**Figuur 36** Luchtsnelheidsfluctuaties op het referentiepunt. Vergelijking tussen metingen en simulaties

**Tabel 26** Errorbar luchtsnelheidsfluctuaties van de metingen en de simulaties over een periode van 30 minuten

	Meting	Simulatie
Gem±Stdev	0.10±0.03	0.08±0.02
Min	0.05	0.04
Max	0.16	0.10

## 3.4. RESULTATEN VARIANTENSTUDIE

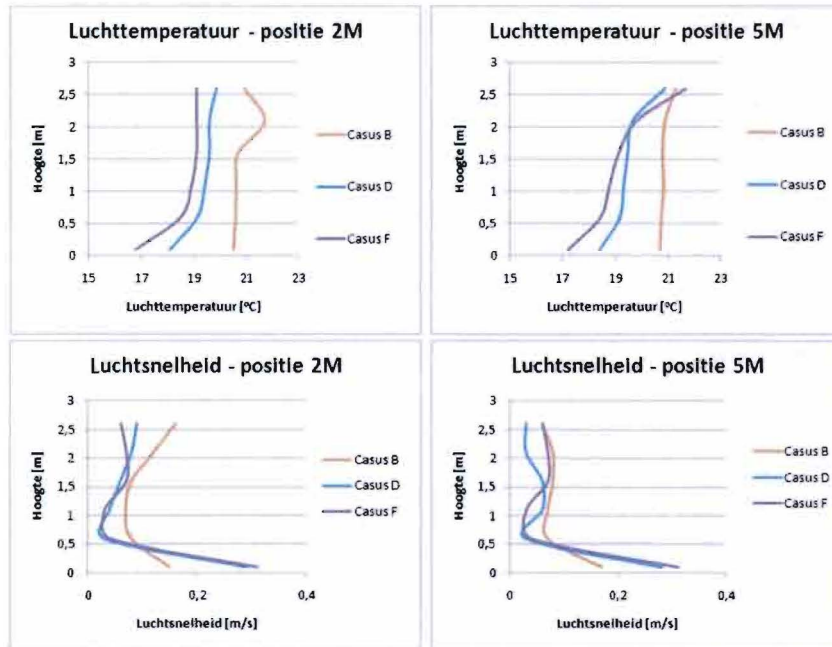
In tabel 27 zijn de resultaten te vinden van de variantenstudie. Er wordt een vergelijking gemaakt tussen de optredende omgevingscondities als gevolg van verschillende inblaastemperaturen, gecombineerde versus enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities en situaties met verschillende vloertemperaturen.

**Tabel 27** Variantenstudie CFD

Inblaastemperatuur	Gecombineerde vs. enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities	Vloertemperatuur
Casus B (16.8°C)	Casus A met Casus B	Casus D (25.2°C)
Casus D (5°C)	Casus C met Casus D	Casus E (27.2°C)
Casus F (-10°C)	Casus C met Casus E	

### 3.4.1. INBLAASTEMPERATUUR

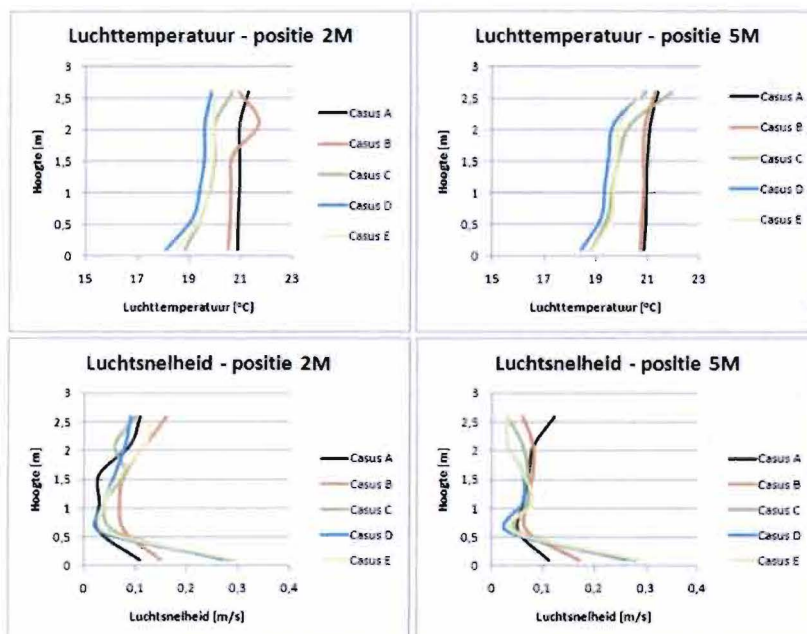
In figuur 37 is de invloed van verschillende inblaastemperaturen te vinden op de optredende luchtsnelheden en luchttemperaturen. De luchttemperatuur is in Casus F het laagst en wordt veroorzaakt doordat er bij alle casussen met hetzelfde debiet wordt ingeblazen. Er geldt dan: hoe lager de inblaastemperatuur hoe hoger het warmteverlies. De luchttemperaturen tussen 0.1 en 0.6m hoogte bij Casus D en Casus F zijn lager dan de luchttemperaturen bij Casus B. Dit impliceert dat bij Casus D en Casus F de worp met koude ventilatielucht het vloerniveau bereikt heeft rond de thermische manikin, waarbij in Casus F, vanwege het grootste verschil tussen inblaastemperatuur en omgevingstemperatuur, de zwaartekracht de grootste invloed heeft op de worp. In Casus B mengt de worp zich beter waardoor er op positie 2M en 5M tussen 0.1 en 0.6m hoogte vrijwel dezelfde luchttemperaturen optreden.



**Figuur 37** Optredende luchtsnelheden en luchttemperaturen bij verschillende inblaastemperaturen

### 3.4.2. GECOMBINEERDE VERSUS ENKELVOUDIGE NIET-UNIFORME OMGEVINGSCONDITIES

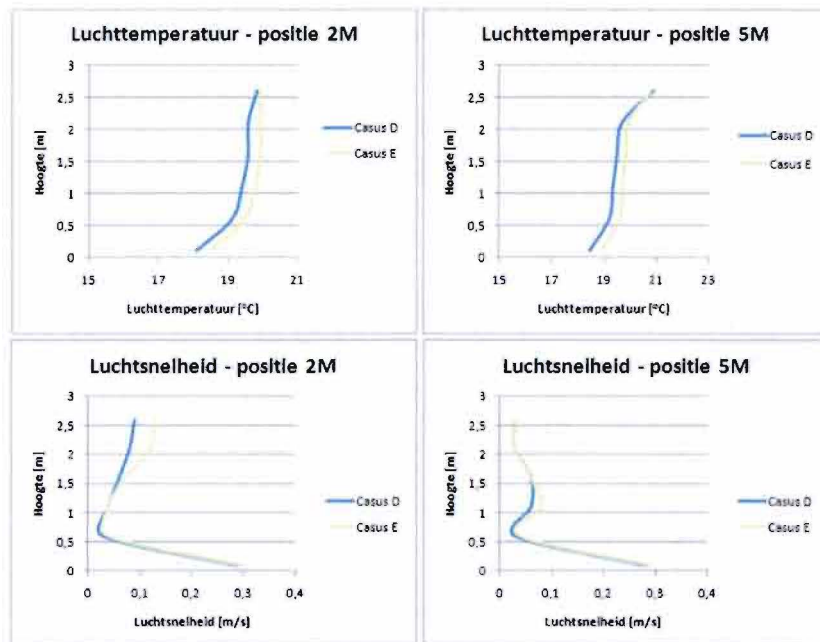
In figuur 38 wordt een vergelijking gemaakt tussen casussen met gecombineerde en casussen met enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities. Het blijkt dat het verschil in luchttemperatuur en luchtsnelheid tussen de casussen C en D, en C en E niet groot is. De verschillen tussen de luchtsnelheden op vloerniveau tussen de casussen C, D en E zijn minimaal (maximaal 0.02m/s). Het verschil tussen de luchtsnelheid op 0.1m hoogte tussen Casus A en Casus B is groter is 0.04m/s.



**Figuur 38** Optredende luchtsnelheden en luchttemperaturen bij gecombineerde en enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities

### 3.4.3. VLOERTEMPERATUUR

De optredende luchtsnelheden en luchttemperaturen als gevolg van een verschil in vloer temperatuur zijn te zien in figuur 39. Het blijkt dat de optredende luchtsnelheden bij Casus E hoger is, maar het verschil is zeer klein ( $RMS < 0.01$  m/s).



**Figuur 39** Optredende luchtsnelheden en luchttemperaturen bij verschillende vloer temperaturen

## 3.5. DISCUSSIE

De verschillende meetposities tijdens kalibratiemetingen zijn gemeten met één statief met sensoren voor luchtsnelheid en luchttemperatuur. Dit betekent dat voor ieder meetpunt het statief verzet moet worden en dat hierdoor verstoringen op kunnen treden in de lucht- en warmtestroming. Om meetdata te verkrijgen waarop deze verstoringen een beperkte invloed hebben is er voor de meetperiode van 5 minuten een stabilisatieperiode van 10 minuten vooraf gegaan. Op het referentiepunt zijn achteraf fluctuaties in de luchtsnelheid gemeten met een duur van 5 tot 10 minuten. Dit betekent dat een meetperiode van 5 minuten niet lang genoeg is gebleken om per meetpunt een gemiddelde te krijgen dat representatief is voor een langere periode. Uitgaande van een stabiele en niet-stationaire situatie is het dus aan te bevelen om bij nieuwe kalibratiemetingen een meetperiode aan te houden waarin meerder fluctuaties kunnen voorkomen, zodat de invloed van deze fluctuaties op het gemiddelde afneemt.

Het uitgangspunt van de kalibratiemetingen waren casussen met dezelfde randvoorwaarden bij de inlaat, zodat een gemeten verschil in luchttemperatuur en -snelheid rondom de thermische manikin alleen kan ontstaan door een verschil in stralingstemperatuurasymmetrie en niet door een verschil in stralingstemperatuurasymmetrie én inlaatcondities. De luchtsnelheid van de inlaat is tijdens de kalibratiemetingen van beide casussen instabiel gebleken. Hierdoor zijn niet alle meetpunten blootgesteld geweest aan dezelfde randvoorwaarden, met het gevolg dat niet ieder meetpunt geschikt is als kalibratiedata voor de CFD-simulaties en daarom is er alleen gekalibreerd op punt 5m van Casus B.

De thermofysiologische onderzoeksruimte kan verbeterd worden door de regelsensor ten behoeve van de inblaastemperatuur dicht bij de ventilatieinlaat van de thermofysiologische onderzoeksruimte te plaatsen. Na de regelsensor moet de toevoerlucht een behoorlijke afstand afleggen voordat het de onderzoeksruimte inkomt. Ondanks de isolatie van de toevoerkanalen vindt er warmte-uitwisseling tussen de toevoerlucht en de omgeving plaats, waardoor de regelsensor voor een andere temperatuur moet regelen dan voor de inblaastemperatuur. De temperatuur waarop geregeld moet worden moet experimenteel worden vastgesteld en dit is onnodig tijdrovend.

Het oplossen van stromingsvraagstukken met CFD als gevolg van een situatie met natuurlijke ventilatie in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem is gecompliceerd gebleken. De luchttemperatuur en luchtsnelheid fluctueren over de tijd. Volgens Rees et al. (2001) past dit verschijnsel bij een situatie met recirculerende stromingen waarin ook thermische pluimen (zoals van de thermische manikin) komen. De fluctuaties zijn ook gemeten tijdens de kalibratiemetingen, maar de fluctuaties in de simulatieresultaten zijn groter en het is onduidelijk hoeveel invloed deze fluctuaties hebben gehad op de voorspelde luchtstromingen. Een tweede probleem is dat de gemeten luchttemperatuur met ongeveer 1°C afwijkt van de gesimuleerde luchttemperatuur. De afgegeven warmtestroom van een vlak met een temperatuur als randvoorwaarde komt niet overeen met een voorspelde warmtestroom op basis van NEN-EN 15377-1 (CFD: 175W en NEN-EN 15377-1: 288W). Het zou dus kunnen dat de warmteoverdrachtscoëfficiënten die CFD aanneemt niet overeenkomen met NEN-EN 15377-1.

Daar komt bij dat ook het warmteverlies door ventilatie overschat kan worden. Op basis van meetresultaten is er een inlaatsnelheid van 1.2 m/s opgelegd. Deze is zowel met een handmeter als met een Dantec gemeten.

Er zijn verschillen in inblaasdebiet gemeten / berekend met de verschillende meetinstrumenten (Dantec 43.2 dm<sup>3</sup>/s, Flow Finder 20 dm<sup>3</sup>/s, pitotbuis 27.8 dm<sup>3</sup>/s, ventilatievoud meting met SF<sub>6</sub>-gas 58.3 dm<sup>3</sup>/s) Voor deze afwijking kunnen meerdere oorzaken zijn:

- De gemeten inblaassnelheid met de Dantec valt buiten het kalibratiebereik (0.06 – 0.78 m/s). Hierdoor kan de daadwerkelijke inblaassnelheid afwijken van de gemeten inblaassnelheid.
- De meting met de pitotbuis kan verkeerde waarden aangeven, doordat er veel bochten in het ventilatiesysteem zitten. Hierdoor is het moeilijk om op een plaats te meten waar de stroming volledig ontwikkeld is en kan dit voor verkeerde meetdata zorgen.
- De meting met het SF<sub>6</sub>-gas kan verstoord zijn geweest door lekken in de klimaatkamer bij bijvoorbeeld kabeldoorvoeringen.

Er zal dus meer onderzoek plaats moeten vinden naar het inblaasdebiet van de thermofysiologische onderzoeksruimte.

De Casussen C, D en E tonen aan dat enkelvoudige of gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem weinig verschil veroorzaken in lokale luchttemperatuur en de luchtsnelheid. Tussen Casus C met Casus D en Casus C met Casus E en Casus D met Casus E is het verschil tussen de luchtsnelheden op 0.1m hoogte maximaal 0.02m/s bij optredende luchtsnelheden van ±0.3m/s. Het verschil tussen de luchtsnelheid op 0.1m hoogte tussen Casus A en Casus B is 0.04m/s bij optredende luchtsnelheden van ±0.12m/s en is dus groter dan het verschil tussen de vorige casussen. Dit is te wijten aan verschillende inblaastemperaturen, waarbij bij Casus B een lagere inblaastemperatuur heeft dan Casus A. Onder de gegeven inblaassnelheid heeft de zwaartekracht heeft meer invloed, waardoor de luchtsnelheden groter worden.



### 3.6. CONCLUSIE

In deze paragraaf wordt een antwoord gegeven op de verschillende onderzoeksvragen.

#### **2. Wat is de invloed van gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities op het thermisch comfort, de thermische sensatie en de thermofysiologische responsies in een situatie met natuurlijke ventilatie in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem?**

Situaties met gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities verschillen in stralingsveld, door een hogere vloertemperatuur en een lagere wandtemperatuur, ten opzichte van enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities. Door deze hogere vloertemperaturen ontstaan hogere luchtsnelheden nabij de vloer, maar deze zijn minimaal (maximaal 0.02 m/s) voor de onderzochte casussen. Simulaties in ThermoSEM en Comfort Zones Diagram moeten uitwijzen of het verschil tussen de luchtsnelheden op 0.1m hoogte invloed hebben gehad op de huidtemperatuur en de thermische sensatie.

#### **3. Hoe kan het thermisch comfort het best voorspeld worden bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem?**

Het voorspellen van de lokale lucht- en warmtestromingen geeft voor een situatie met natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem meer informatie over de weg die de worp aflegt. Uit de variantenstudie is gebleken dat bij lage inblaastemperaturen (5°C en -10°C) de luchtsnelheden bij de vloer hoger zijn en de luchttemperatuur lager dan de gemiddelde luchtsnelheid en luchttemperatuur. Bij hogere inblaastemperaturen (16.8 en 17.5°C) is het verschil tussen de inblaas- en omgevingstemperatuur kleiner waardoor de zwaartekracht minder invloed heeft en de lucht zich beter kan mengen met de omgevingslucht voordat de worp in de buurt van de thermische manikin kan komen. Dit resulteert in een redelijk uniforme luchttemperatuur en luchtsnelheden die nabij de vloer hoger zijn. Een combinatie met ThermoSEM en Comfort Zones Diagram moet uitwijzen of het voorspellen van thermische sensatie met lokale lucht- en warmtestromingen van toegevoegde waarde is.



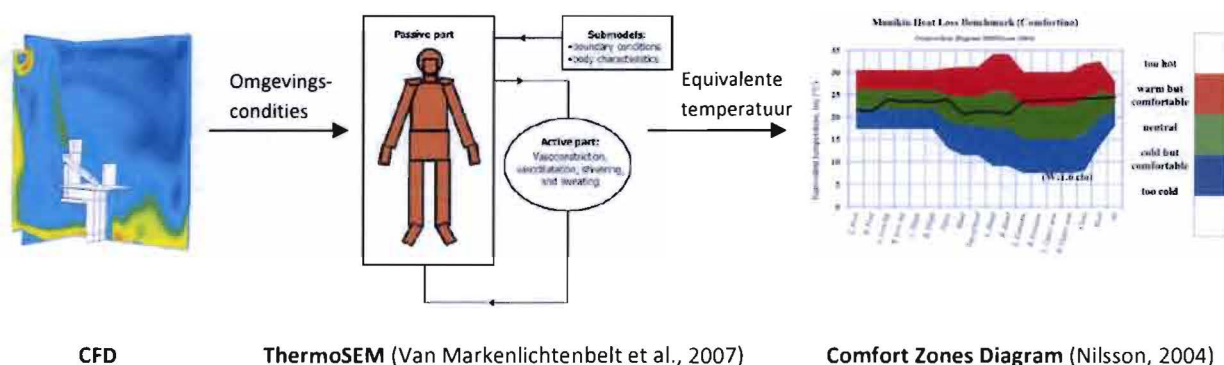
## HOOFDSTUK 4

# BEOORDELEN VAN THERMISCH COMFORT MET THERMOSEM EN COMFORT ZONES DIAGRAM

In dit hoofdstuk wordt onderzocht of ThermoSEM (Van Markenlichtentbelt et al., 2007) een goede voorspelling kan geven van de thermofysiologische responsies en of deze responsies gekoppeld met Comfort Zones (Nilsson, 2004) een goede voorspelling kunnen geven van de algehele en lokale thermische sensatie. Ook zal de thermische sensatie voorspeld worden als gevolg van de omgevingscondities die gevonden zijn met behulp van de variantenstudie uit hoofdstuk 3, met als uiteindelijke doel het beoordelen van de prestatie van de PMV bij niet-uniforme omgevingscondities.

### 4.1. METHODEN

De koppeling CFD (voorspellen van omgevingscondities), ThermoSEM (voorspellen van equivalente temperatuur) en Comfort Zones Diagram (voorspellen van thermische sensatie) is een methode waarmee de thermische sensatie onder niet-uniforme omgevingscondities voorspeld kan worden, zie figuur 40. Om te beoordelen hoe goed de thermische sensatie voorspeld wordt, vindt er een validatiestudie plaats. Allereerst wordt ThermoSEM gevalideerd aan de hand van de meetresultaten van de huidtemperaturen en wordt de Comfort Zones Diagram gevalideerd aan de hand van thermische sensatie beoordelingen. Daarna vinden simulaties voor de voorspelling van de huidtemperaturen en thermische sensatie plaats voor de verschillende varianten.



**Figuur 40** Methode voor het voorspellen van de thermofysiologische responsies en de thermische sensatie

#### 4.1.1. ThermoSEM

ThermoSEM is een thermofysiologisch model voor het voorspellen van onder andere lokale huidtemperaturen en de kerntemperatuur. Het model is opgebouwd uit cilinders en een bol die de lichaamsdelen representeren en zijn onderverdeeld in sectoren zodat de invloed van asymmetrische condities ook meegenomen kan worden. ThermoSEM bestaat uit een passief en een actief deel. Het passieve deel modelleert het warmtetransport in het lichaam en het actieve deel representeert het thermoregulatiesysteem. Door middel van convectie, straling, geleiding, verdamping en vochtdiffusie vindt er een wisselwerking plaats tussen het

thermofysiologisch model en de omgeving (Schellen et al., 2010). Er wordt gebruik gemaakt van een ThermoSEM versie die geschikt is voor niet-uniforme omgevingen. Deze omgeving kan gedefinieerd worden door luchtsnelheden, luchttemperaturen en relatieve luchtvochtigheid voor 6 posities, zoals aangegeven in figuur 41. Daarnaast kan er per wand, vloer en plafond een oppervlaktetemperatuur worden opgelegd. In ThermoSEM kunnen karakteristieken zoals het metabolisme en de positie (staan/zitten) worden meegenomen. Vooral nog zijn simulaties in ThermoSEM gebaseerd op de antropomorfische eigenschappen van één persoon.



**Figuur 41** Posities voor het definiëren van de omgeving

#### VALIDATIE THERMOSEM

Doordat de standaard persoon in ThermoSEM een vetpercentage heeft van 14.4% en deze het meest overeenkomt met PP37 worden de gesimuleerde huidtemperaturen van Casus A en Casus B vergeleken met de gemeten huidtemperaturen van PP37. Om te beoordelen hoe groot de individuele karakteristieken de huidtemperatuur beïnvloeden en in hoeverre dit afwijkt van ThermoSEM simulaties wordt er ook een vergelijking gemaakt tussen gesimuleerde huidtemperaturen en het gemiddelde van alle huidtemperaturen. De invoer van de omgevingscondities in ThermoSEM zijn hierbij de meetresultaten van de hele meetessie van Casus A en Casus B. Voorafgaand aan deze gemeten condities wordt er een periode van 600 minuten met constante omgevingscondities, gelijk aan de eerste meetwaarde van Casus A, gesimuleerd. Dit heeft als doel dat de startwaarden van de huidtemperaturen in de simulatie dezelfde zijn als tijdens het proefpersoononderzoek. De huidtemperaturen waarop gevalideerd wordt zijn handen, voeten, hoofd, gemiddelde huidtemperatuur en distale en proximale huidtemperatuur.

#### VALIDATIE COMBINATIE CFD MET THERMOSEM

De voorspelling van de huidtemperaturen van Casus C tot en met Casus F vindt plaats met de omgevingscondities uit CFD-simulaties, zie bijlage 9. Daarom wordt de combinatie, ThermoSEM met als invoer CFD-resultaten ook gevalideerd. De simulaties van de huidtemperaturen vinden plaats met constante omgevingscondities over een periode van 600 minuten, omdat is gebleken dat deze tijd in ThermoSEM nodig is om de huidtemperaturen hun eindtemperatuur te laten bereiken. De voorspelde huidtemperaturen worden vergeleken met de huidtemperaturen van het gemiddelde van de proefpersonen en van PP37 bij Casus A en Casus B.

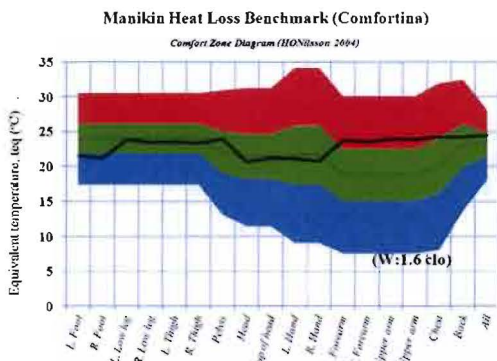
#### 4.1.2. Comfort Zones Diagram

Comfort Zones Diagram is een methode waarbij zowel de algehele als de lokale thermische sensatie van een persoon voorspeld kan worden. De Comfort Zones Diagram is gebaseerd op de equivalente temperatuur (Nilsson, 2004), zie vergelijking 3, die zowel voor het hele lichaam als voor individuele lichaamsdelen berekend kan worden. De equivalente temperatuur kan volledig berekend worden met de uitvoer van ThermoSEM.

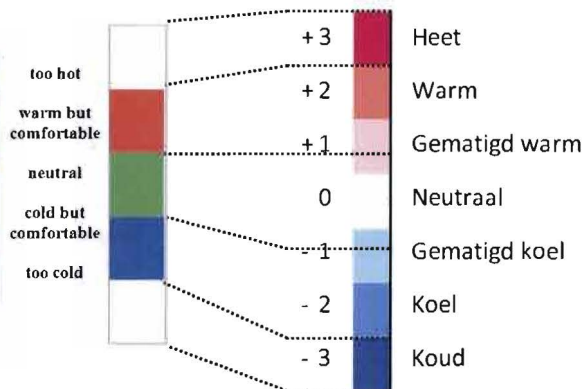
$$t_{eq} = t_{skin} - \frac{R+C}{(h_r + h_c)} \quad [3]$$

$t_{eq}$	=	equivalente temperatuur	[°C]
$t_{skin}$	=	huidtemperatuur	[°C]
$R$	=	warmtestroomdichtheid van afgegeven straling	[W/m <sup>2</sup> ]
$C$	=	convectieve warmtestroomdichtheid	[W/m <sup>2</sup> ]
$h_r$	=	warmteoverdrachtscoëfficiënt straling	[W/m <sup>2</sup> K]
$h_c$	=	convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt	[W/m <sup>2</sup> K]

Comfort Zones Diagram bestaat uit 5 gebieden, zie figuur 42: neutraal, warm maar comfortabel, koud maar comfortabel, te koud en te warm. Het hele lichaam is alleen comfortabel wanneer de thermische sensatie van de lokale delen ongeveer gelijk is aan de thermische sensatie van het hele lichaam of wanneer bijvoorbeeld lokale koude, maar comfortabele, delen gecompenseerd worden door lokale warme, maar comfortabele, delen. Er bestaan Comfort Zones Diagrams voor de thermische sensatie bij verschillende kledingweerstand; voor dit onderzoek is er gebruik gemaakt van diagram W:1.6 clo (Nilsson, 2004), dat bestaat uit een lange broek, een T-shirt en een vest met daaronder ondergoed, sokken en schoenen.



Figuur 42 Comfort Zones Diagram



Figuur 43 ASHRAE'S Thermische sensatie schaal

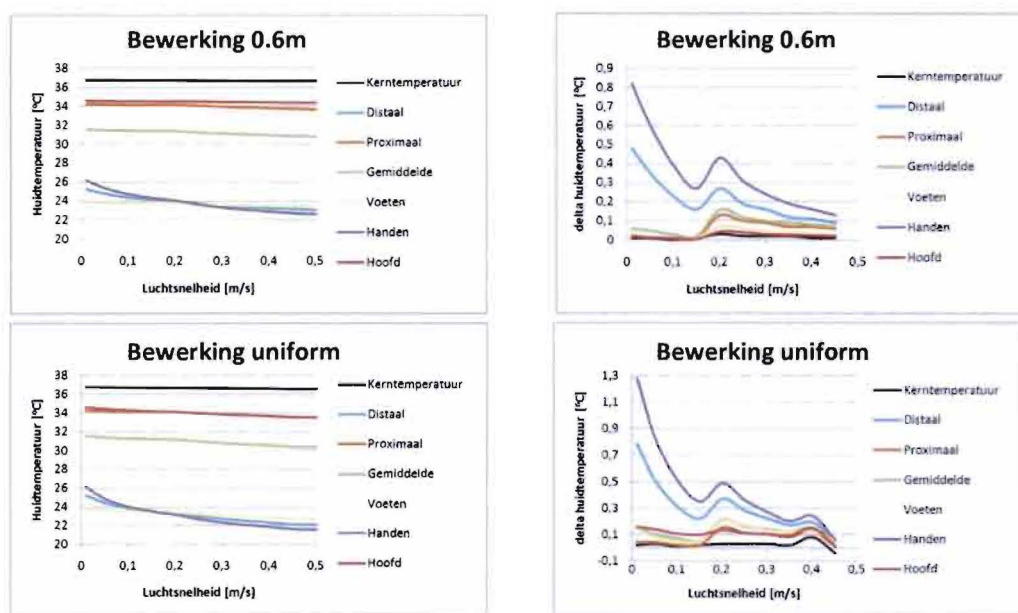
VALIDATIE COMBINATIE THERMOSEM MET COMFORT ZONES DIAGRAM

Het valideren van de voorspelde lokale thermische sensatie met Comfort Zones Diagram met de lokale thermische sensatie beoordeling (AMV) van het proefpersoononderzoek is complex. De Comfort Zones Diagram is gebaseerd op de MTV-schaal, terwijl de AMV gebaseerd is op ASHRAE's thermische sensatie schaal, Op basis van de proefpersoonresultaten is er een verschaling toegepast, waarbij een AMV omgezet kan worden in een waarde voor Comfort Zones Diagram, zie figuur 43. Deze verschaling bestaat uit een combinatie van thermische sensatie en thermisch comfort beoordelingen. Het model is valide indien zowel Comfort Zones Diagram en de AMV dezelfde indicatie geven van de thermische omgeving voor Casus A en Casus B.

4.1.3. Gevoeligheid ThermoSEM en Comfort Zones Diagram voor luchtsnelheden

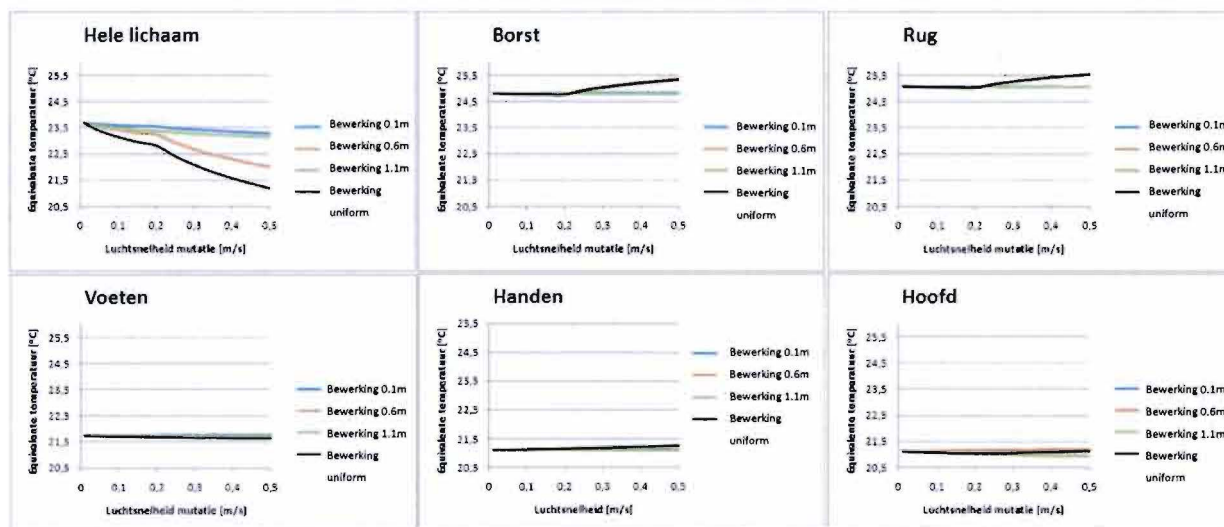
Het beoordelen van de gevoeligheid van ThermoSEM en Comfort Zones Diagram op luchtsnelheden heeft als doel meer inzicht te krijgen in de verandering van de huidtemperaturen en thermische sensatie van lichaamsdelen bij verschillende luchtsnelheden. De veranderingen die zijn aangebracht worden onderverdeeld in 'bewerking uniform' (luchtsnelheden voor alle posities gelijk), 'bewerking 0.1m' (luchtsnelheid varieert op 0.1m), 'bewerking 0.6m' (luchtsnelheid varieert op 0.6m) en 'bewerking 1.1m' (luchtsnelheid varieert op 1.1m).

Bij de laatste drie typen bewerkingen is de luchtsnelheid op hoogtes waar geen bewerking plaatsvindt 0.01 m/s. De bewerkingen van alle vier de typen betreffen constante luchtsnelheden van 0.01, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, en 0.50 m/s. De bewerkingen vinden plaats bij een constante luchttemperatuur van 21.5°C en een wand-, vloer-, en plafondtemperatuur van 21.5°C bij een relatieve luchtvochtigheid van 40%. In figuur 44 worden de resultaten van de gevoeligheidsstudie van ThermoSEM gepresenteerd voor *Bewerking uniform* en *Bewerking 0.6m*, omdat deze bewerkingen de meeste invloed hebben gehad op de huidtemperaturen. De resultaten van *Bewerking 0.1m* en *Bewerking 1.1m* zijn terug te vinden in bijlage 9. Behalve de huidtemperaturen wordt ook de afgeleide van deze huidtemperaturen gepresenteerd. Het blijkt dat de huidtemperatuur van de handen het meest gevoelig is voor luchtsnelheden. De huidtemperatuur van het hoofd en de proximale lichaamsdelen zijn minder gevoelig. Opvallend is dat de delta huidtemperatuur bij 0.2 m/s voor *Bewerking 0.6m* en *Bewerking uniform* toeneemt en bij 0.4 m/s voor *Bewerking uniform*. Dit wordt veroorzaakt door de gebruikte warmteoverdrachtscoëfficiënten in ThermoSEM.



**Figuur 44** Huidtemperaturen bij als gevolg van *Bewerking 0.6m* en *Bewerking uniform*

De equivalente temperaturen van de verschillende huidtemperaturen worden gepresenteerd in figuur 45. Waar de huidtemperaturen van de handen het meest gevoelig waren voor een verandering van de luchtsnelheid blijkt dat de luchtsnelheid nauwelijks invloed heeft gehad op de equivalente temperatuur. Ook de equivalente temperatuur van de voeten en het hoofd blijkt weinig gevoelig te zijn voor een verandering in luchtsnelheid. De borst en rug daarentegen zijn het meest gevoelig voor *Bewerking 0.6m* en *Bewerking uniform*. Opvallend is dat de equivalente temperatuur toeneemt in plaats van afneemt; dat suggereert dat de thermische sensatie warmer wordt. De equivalente temperatuur van het hele lichaam neemt wel af bij hogere luchtsnelheden. Deze afname is hierbij ook het grootst bij *Bewerking 0.6m* en *Bewerking uniform*. Uiteindelijk blijkt alleen de equivalente temperatuur bij *Bewerking uniform* vanaf 0.4 m/s zo laag te zijn dat er thermisch comfort klachten kunnen ontstaan (bij gegeven overige condities).



**Figuur 45** Equivalente temperatuur bij Bewerking Uniform, Bewerking 0.1m, Bewerking 0.6m, en Bewerking 1.1m

#### 4.1.4. Variantenstudie met ThermoSEM en Comfort Zones Diagram

De variantenstudie heeft als doel om meer inzicht te krijgen in de thermische sensatie en de huidtemperaturen bij natuurlijke ventilatietoevoer in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem bij:

- Verschillende inblaastemperaturen;
- Gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities ten opzichte van enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities voor een situatie met dezelfde inblaastemperatuur;
- Verschillende vloertemperaturen.

De invoer van de omgevingscondities in ThermoSEM bestaan uit de luchttemperatuur, de lichtsnelheid en de wand-, vloer- en plafondtemperatuur en is het resultaat van de CFD-simulaties. De relatieve luchtvochtigheid is bij iedere variant 40%. In tabel 28 is te vinden welke casussen per vergelijking gebruikt worden.

**Tabel 28** Variantenstudie ThermoSEM en Comfort Zones Diagram

Inblaastemperatuur	Gecombineerde vs. enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities	Vloertemperatuur
Casus B (16.8°C)	Casus A met Casus B	Casus D (25.2°C)
Casus D (5°C)	Casus C met Casus D	Casus E (27.2°C)
Casus F (-10°C)	Casus C met Casus E	

## 4.2. RESULTATEN

Als eerste worden de validatieresultaten besproken van ThermoSEM en Comfort Zones Diagram. Daarna de gesimuleerde huidtemperaturen en de thermische sensatie van Casus A tot en met F.

### 4.2.1. Validatieresultaten ThermoSEM

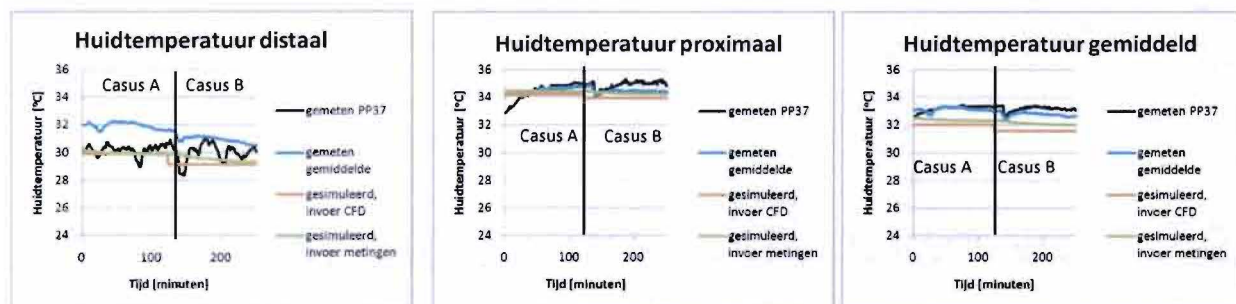
In figuur 46 en figuur 47 worden de gesimuleerde distale, proximale en gemiddelde huidtemperatuur en de huidtemperatuur van de voet, de hand en het hoofd vergeleken met de meetresultaten van PP37 en het gemiddelde van alle proefpersonen per lichaamsdeel. De gesimuleerde huidtemperaturen hebben als invoer de omgevingscondities uit de meetsessie van PP37 of de lichtsnelheid, luchttemperatuur, wand-, vloer-, en plafondtemperatuur uit de CFD-simulaties met een relatieve luchtvochtigheid van 40%. De verschillen tussen

de gesimuleerde huidtemperaturen met als invoer gemeten omgevingscondities en omgevingscondities uit CFD zijn over het algemeen verklaarbaar doordat de gemiddelde luchttemperatuur van de CFD-simulaties gemiddeld 1°C afwijkt ten opzichte van de gemeten luchttemperatuur.

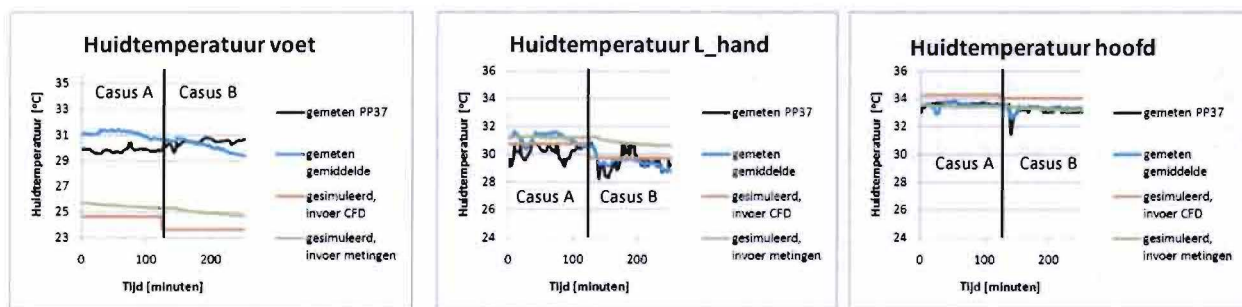
In tabel 29 staan de afwijkingen van de gemeten huidtemperaturen en de gesimuleerde huidtemperaturen van zowel PP37 als van de gemiddelden van alle proefpersonen. De RMS ( $\leq 1.4^{\circ}\text{C}$ ) tussen de gemeten en gesimuleerde gemiddelde huidtemperatuur past binnen de verwachtingen ( $\text{RMS}=1.3^{\circ}\text{C}$ ) van het onderzoek van Van Marken Lichtenbelt et al. (2007). Het blijkt dat het verschil tussen de gemeten en de gesimuleerde huidtemperaturen van de voet groot is ( $\text{RMS} = 4.8$  tot  $6.0^{\circ}\text{C}$ ). De distale huidtemperatuur is in ThermoSEM een gemiddelde van de huidtemperatuur van de handen, de voeten en het hoofd. Door het verschil tussen gemeten en gesimuleerde huidtemperaturen bij de voeten is het verschil tussen de gemeten en gesimuleerde distale huidtemperatuur RMS is  $0.7$  tot  $2.0^{\circ}\text{C}$ .

**Tabel 29** Root mean square (RMS) van het verschil tussen de gemeten huidtemperatuur (PP37 en gemiddelde van alle proefpersonen) ten opzichte van de gesimuleerde huidtemperatuur (invoer omgevingscondities in CFD en gemeten omgevingscondities).

	Invoer meetresultaten	Invoer CFD-resultaten	Invoer meetresultaten	Invoer CFD-resultaten
	PP37	PP37	Gemiddelde	Gemiddelde
RMS gemiddelde	1.0°C	1.4°C	0.7°C	1.2°C
RMS proximaal	0.7°C	0.9°C	0.2°C	0.5°C
RMS distaal	0.7°C	0.8°C	1.7°C	2.0°C
RMS hoofd	0.3°C	0.8°C	0.2°C	0.8°C
RMS linker hand	1.5°C	0.7°C	1.0°C	0.5°C
RMS voet	4.8°C	6.0°C	5.4°C	6.5°C



**Figuur 46** Validatieresultaten distale, proximale en gemiddelde huidtemperatuur (NEN-EN-ISO 9886, 2004)

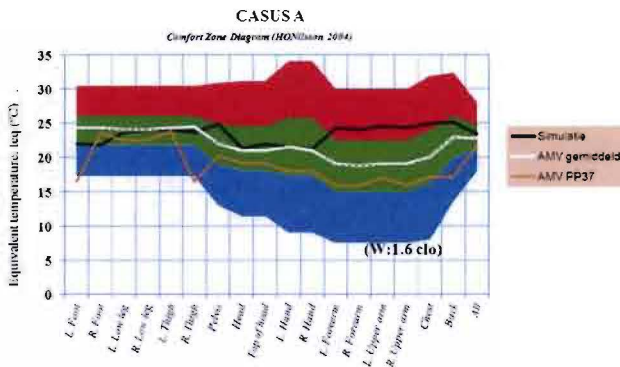


**Figuur 47** Validatieresultaten huidtemperatuur van voet, linker hand en hoofd

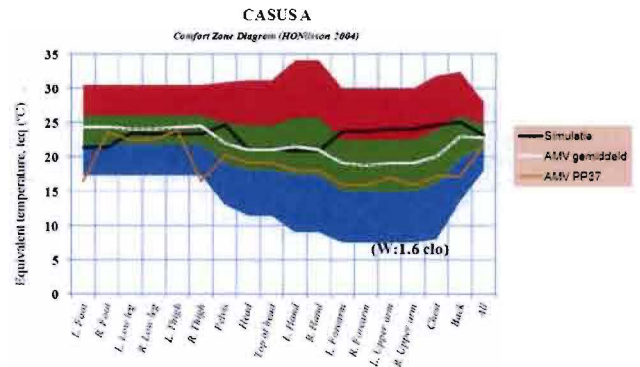


### 4.2.2. Validatieresultaten Comfort Zones Diagram

In figuur 48 tot en met figuur 49 worden de gesimuleerde lokale thermische sensaties en de algehele thermische sensatie vergeleken met de thermische sensatiebeoordeling van PP37 en de thermische sensatiebeoordelingen gemiddeld over alle proefpersonen voor Casus A en Casus B. Uit de AMV blijkt dat de algehele thermische sensatie van PP37 neutraal is, maar kouder dan de gemiddelde AMV en de gesimuleerde AMV. Ook blijkt dat de linker voet van PP37 oncomfortabel koud was, terwijl de gesimuleerde linker voet op de grens tussen neutraal en koud maar comfortabel zit. De gemiddelde AMV voor de linkervoet is neutraal. Uit het proefpersoononderzoek is gebleken dat de handen, de voeten en het hoofd grote invloed hebben op de algehele thermische sensatie. De gesimuleerde equivalente temperatuur van de onderbenen, de dijen, het bekken, het hoofd en de linker hand en de algehele thermische sensatie komen vrij goed overeen met de gemiddelde AMV. De thermische sensatie van de armen, de rug en de borst wordt overschat. Dit geldt zowel voor de situatie waarbij de invoer van ThermoSEM gebaseerd is op meetresultaten als op condities uit CFD. De thermische sensatie van PP37 wordt over het algemeen te warm geschat. Hieruit blijkt dat Comfort

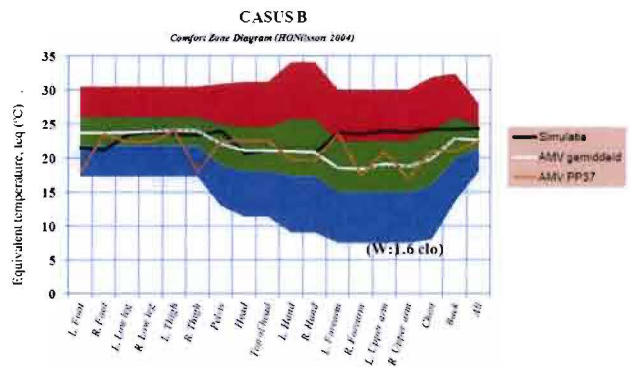


**Figuur 48** Vergelijking Comfort Zones Diagram (invoer gemeten omgevingscondities) met AMV van PP37 en AMV gemiddeld.

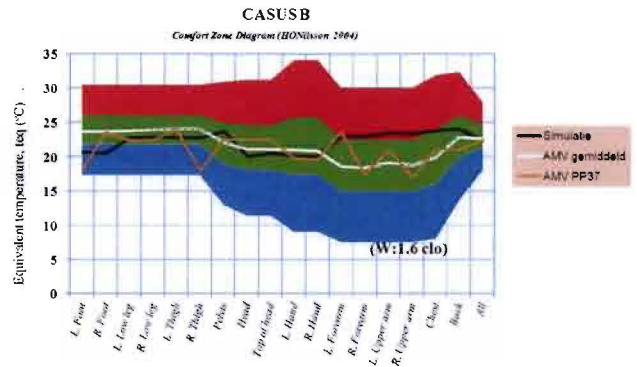


**Figuur 49** Vergelijking Comfort Zones Diagram (invoer CFD-condities) met AMV van PP37 en AMV gemiddeld.

Zones Diagram onder de gebruikte invoercondities bruikbaar is als voorspellingsmodel voor een gemiddelde AMV. Het voorspellen van individuele thermische sensatie bij een individuele equivalente temperatuur kan afwijken geven.



**Figuur 50** Vergelijking Comfort Zones Diagram (invoer gemeten omgevingscondities) met de AMV van PP37.



**Figuur 51** Vergelijking Comfort Zones Diagram (invoer CFD-condities) met de AMV van PP37 en de gemiddelde AMV.

### 4.2.3. Simulatieresultaten ThermoSEM & Comfort Zones Diagram

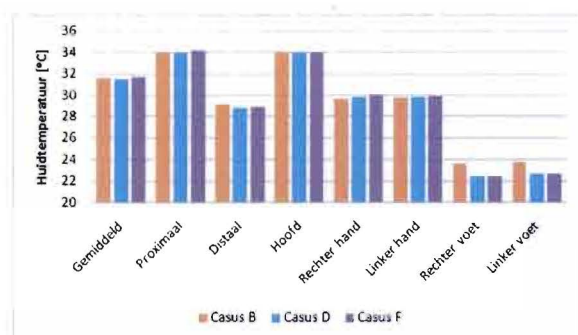
De simulatieresultaten zijn gebaseerd op omgevingscondities als resultaat van CFD-simulaties van de casussen A tot en met F. Deze omgevingscondities zorgen voor verschillen in de gemiddelde operationele temperatuur en PMV-waarde tussen de casussen, zie tabel 30.

**Tabel 30** Omgevingscondities

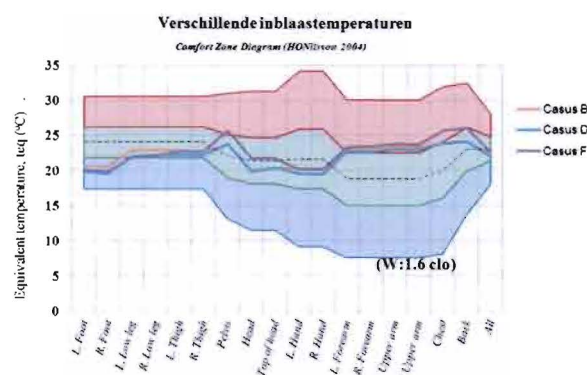
	Operatieve temperatuur	PMV-waarde		Operatieve temperatuur	PMV-waarde
Casus A	21.3	-0.05	Casus D	21.3	-0.15
Casus B	21.35	-0.1	Casus E	21.1	-0.13
Casus C	21.45	-0.15	Casus F	21.75	-0.08

#### INVLOED INBLAASTEMPERATUUR OP HUIDTEMPERATUREN EN EQUIVALENTE TEMPERATUUR

De inblaastemperatuur zorgt voor lokale verschillen in luchtsnelheid en luchttemperatuur, zie hoofdstuk 3. Deze verschillen zijn het grootst bij de vloer en dit is ook terug te zien aan de verschillende huidtemperaturen van de voeten, zie figuur 52. De algehele thermische sensatie ligt bij Casus D en Casus F aan de rand van het neutrale gebied. De thermische sensatie bij de benen wordt kouder naarmate de inblaastemperatuur daalt en de voeten liggen zelfs in het 'cold but comfortable' gebied. De overige lichaamsdelen liggen in het neutrale gebied en de boven en onderarm vallen net in het 'warm but comfortable', waardoor ze geen compensatie kunnen bieden voor de delen die in het 'cold but comfortable' gebied liggen en de situatie dus oncomfortabel is. De gemiddelde huidtemperatuur bij Casus F is hoger dan bij Casus D. Dit komt doordat bij Casus F de temperatuur van de wanden hoger is dan bij Casus D, waardoor de stralingstemperatuur voor de lokale lichaamsdelen ook hoger is.



**Figuur 52** Huidtemperaturen bij verschillende inblaastemperaturen

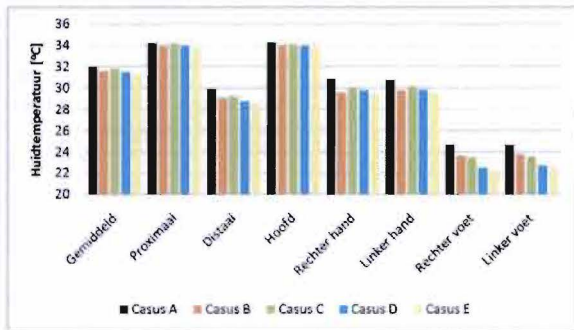


**Figuur 53** Comfort Zones Diagram met equivalente temperatuur van Casus B, D en F.

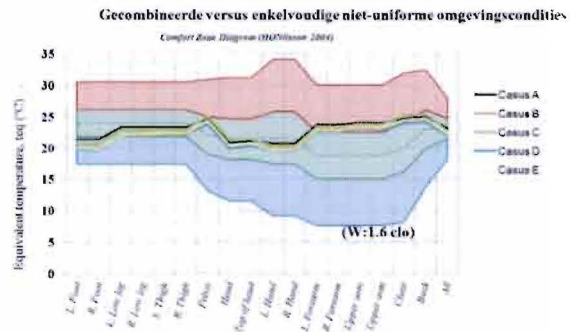
#### GECOMBINEERDE VS. ENKELVOUDIGE NIET-UNIFORME OMGEVINGSCONDITIES OP HUIDTEMPERATUREN EN EQUIVALENTE TEMPERATUUR

Het blijkt dat de verschillen tussen de situatie met gecombineerde (Casus B, D en E) en de enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities (Casus A en C) in gemiddelde, proximale huidtemperatuur en de huidtemperatuur van het hoofd minimaal is. Echter, voor de handen en de voeten is dit verschil groter, zie figuur 54. Bij gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities komt een asymmetrische stralingstemperatuur voor is terwijl bij enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities de temperatuur van alle de wanden, de vloer en het plafond gelijk zijn. Deze asymmetrische stralingstemperatuur kenmerkt zich door een hogere vloertemperatuur en een lagere wandtemperatuur ten opzichte van de enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities. Door de hogere vloertemperatuur worden de luchtsnelheden op 0.1m hoogte groter en als gevolg van de wandtemperatuur is de stralingstemperatuur per lichaamsdeel lager. Hierdoor koelt het

lichaam meer af en worden de huidtemperaturen lager. Dit resulteert in een lagere equivalente temperatuur bij de gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities ten opzichte van de enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities, zie figuur 55. Het verschil is niet groot genoeg om een verschil te maken tussen een comfortabele en een oncomfortabele situatie.



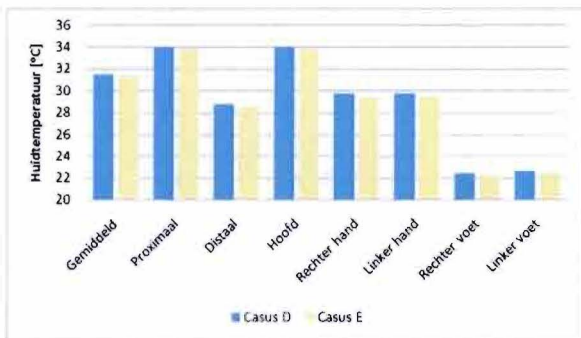
**Figuur 54.** Huidtemperaturen: gecombineerde vs. enkelvoudige niet-uniforme omgevingsconditie



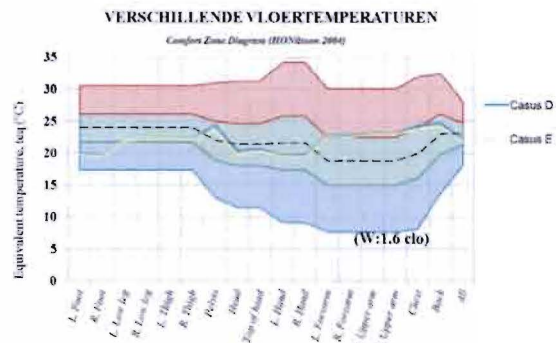
**Figuur 55.** Thermische sensatie: gecombineerde vs. enkelvoudige niet-uniforme omgevingsconditie

INVLOED VLOERTEMPERATUUR OP HUIDTEMPERATUREN EN EQUIVALENTE TEMPERATUUR

Figuur 56 presenteert de huidtemperaturen bij verschillende vloertemperaturen voor dezelfde PMV (-0.15). Het blijkt dat in een situatie met een hogere vloertemperatuur de huidtemperaturen en de equivalente temperatuur lager worden, zie figuur 57. Oorzaak kunnen de verschillen in optredende luchtsnelheden (RMS=0.01 m/s) en luchttemperaturen (RMS=0.04°C) zijn of het verschil in de lokale stralingstemperatuur als gevolg van een verschil in wandtemperatuur van 1°C.



**Figuur 56** Huidtemperaturen bij verschillende vloertemperaturen



**Figuur 57** Thermische sensatie bij verschillende vloertemperaturen

4.3. DISCUSSIE

ThermoSEM simulaties zijn gebaseerd op de antropomorfische eigenschappen van één persoon. Op basis van deze persoon kunnen de huidtemperaturen als gemiddelde van alle proefpersonen en van PP37 vrij goed voorspeld worden (RMS < 1.5°C). De temperatuur van de voet wordt onderschat. Deze huidtemperatuur wordt op de wreef van de voet gemeten, terwijl de huidtemperatuur van de tenen lager kan zijn. Hierdoor kan deze mogelijk geen goede afspiegeling geven voor de gemiddelde huidtemperatuur van de voet, zoals ThermoSEM dat doet. Het is daarom aan te bevelen om te onderzoeken of het meten van de huidtemperatuur van de voet op meerdere locaties op de voet een betere overeenkomst geeft met de gesimuleerde huidtemperaturen. Hierdoor kan uitgezocht worden of deze onderschatting door de gebruikte meetmethode komt.

De voorspelde thermische sensatie met behulp van Comfort Zones Diagram blijkt voor vrij goed overeen te komen met de gemiddelde thermische sensatie van de lokale lichaamsdelen van de proefpersonen. Voor een individu, PP37, worden de lokale en algehele thermische sensatie te warm wordt voorspeld. Het blijkt dus dat met de gegeven invoer de thermische sensatie dus wel goed voorspeld kan worden als gemiddelde van een groep mensen, maar nog niet voor individuen. Wil de combinatie van ThermoSEM en Comfort Zones Diagram ingezet worden voor het voorspellen van het lokaal thermisch comfort bij lokale omgevingscondities dan is het aan te bevelen ThermoSEM versie voor niet-uniforme omgevingscondities uit te breiden met een interface om op een eenvoudige manier de antropomorfe eigenschappen van iedere willekeurige persoon mee te nemen. Hierdoor kan deze ThermoSEM versie eenvoudig gevalideerd worden voor persoonskenmerken.

De koppeling van CFD, ThermoSEM en Comfort Zones Diagram is gevalideerd op natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsstelsel bij een inblaastemperatuur van 16.8°C. Uit de variantenstudie met CFD is gebleken dat bij een inblaastemperatuur van 5°C de luchttemperatuur bij de voeten af kan koelen naar 18°C met lichtsnelheden van 0.30 m/s. Het valideren van de koppeling van CFD, ThermoSEM en Comfort Zones Diagram voor deze inblaastemperatuur kan een goede aanvulling zijn om de betrouwbaarheid van de simulaties met deze modellen te verhogen. Voor een vervolg onderzoek is het daarom aan te bevelen gebruik te maken van een actief koelsysteem voor de toevoerlucht van de thermofysiologische onderzoeksruimte zodat er met een lagere temperatuur ingeblazen kan worden.

Uit het proefpersoononderzoek is gebleken dat tocht de algehele thermische sensatie significant kan verklaren. Met tocht wordt hier een combinatie van luchttemperatuur, lichtsnelheid en turbulentie-intensiteit bedoeld. Echter in ThermoSEM wordt de turbulentie-intensiteit niet expliciet meegenomen, terwijl uit het proefpersoononderzoek is gebleken dat deze een significante relatie ( $p < 0.50$ ) heeft op de huidtemperatuur van de handen. De turbulentie-intensiteit kan waarden aannemen van 50% bij een gemiddelde lichtsnelheid van 0.14 m/s. Daarom is het aan te bevelen ThermoSEM uit te breiden met een invoer voor de turbulentie-intensiteit.

Het verschil tussen de casussen met enkelvoudige en gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities is dat bij gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities een asymmetrische stralingstemperatuur aanwezig is terwijl bij enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities de temperatuur van alle de wanden, de vloer en het plafond gelijk zijn. Deze asymmetrische stralingstemperatuur kenmerkt zich door een hogere vloertemperatuur en een lagere wandtemperatuur ten opzichte van de enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities.

De PMV neemt echter alleen een waarde mee voor de gemiddelde stralingstemperatuur (conform NEN-EN-ISO 7726). In situaties waar stralingstemperatuurasymmetrieën voorkomen met een lagere wandtemperatuur en een hogere vloertemperatuur gaat NEN-EN-ISO 7726 ervan uit dat de vloer een grote bijdrage heeft aan de gemiddelde stralingstemperatuur voor zittende personen. Echter uit de simulaties met ThermoSEM en Comfort Zone Diagram blijkt dat de invloed van de stralingstemperatuur van de wanden op de huidtemperatuur en equivalente temperatuur groter is. Wanneer zich een extremere situatie voordoet met een lage stralingstemperatuur op de wanden en het plafond en een hoge vloertemperatuur zou het mogelijk kunnen zijn dat de PMV een goede thermische sensatie voorspelt op basis van een gemiddelde stralingstemperatuur, terwijl de bijdrage van de koude wanden zorgt voor een koude (oncomfortabele) situatie. Daarom is het aan te bevelen de definitie van de gemiddelde stralingstemperatuur te herzien naar een waarde die een (gewogen) gemiddelde is van de stralingstemperatuur van alle lokale lichaamsdelen.

Ook is in NEN-EN-ISO 7730 geen vergelijking opgenomen voor het aantal ontevreden mensen als gevolg van een asymmetrische stralingstemperatuur veroorzaakt door een verhoogde vloertemperatuur. Yoon et al. (1992) heeft onderzocht dat een stralingstemperatuurasymmetrie tot 11°C toelaatbaar is voor verhoogde

vloertemperaturen bij 5% ontevreden mensen. Hiervoor is echter geen vergelijking opgesteld, zodat ook het aantal ontevreden mensen bij andere stralingstemperatuurasymmetrieën bepaald kunnen worden. Daarom moet er meer onderzoek gedaan worden naar het aantal ontevreden mensen bij stralingstemperatuur asymmetrieën als gevolg van een verhoogde vloertemperatuur.

De DR is gebaseerd op een thermische sensatie van mensen dicht bij neutraal. Echter, bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem kan de werp van de ventilatielucht ook zorgen voor lokaal koude lichaamsdelen, zoals de voeten. Het is onduidelijk hoe waarden van de DR dan geïnterpreteerd moeten worden en daarom zou er meer onderzoek gedaan moeten worden naar het aantal ontevredenen bij tochtklachten wanneer er ook lokaal koude lichaamsdelen zijn.

Uit de gevoeligheidsstudie van ThermoSEM en Comfort Zones Diagram blijkt ook dat het lichaam verschillend kan reageren op veranderende luchtsnelheden. De DR is ontworpen op het feit dat de nek het meest gevoelige lichaamsdeel is voor veranderingen in de luchtsnelheid en kan klachten bij de voeten en de armen overschatten (NEN-EN-ISO 7730, 2005). Uit de gevoeligheidsstudie met ThermoSEM is gebleken dat het lichaam sterker reageert op veranderingen van de luchtsnelheid op 0.6m (dijniveau) dan op nekniveau. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat op een hoogte van 0.6m de vitale organen liggen. Het lichaam heeft een vergrote dichtheid van koude-receptoren in dat gebied, waardoor het lichaam sneller reageert op veranderingen in het thermisch klimaat (Nakamura et al., 2008). Het is dus interessant om ook de DR te evalueren voor het aantal ontevredenen als gevolg van luchtstromingen op dijniveau.

Volgens Zang et al. (2010) is het thermisch comfort in niet-uniforme binnenklimaten meer afhankelijk van het thermisch comfort van lokale lichaamsdelen dan van het hele lichaam. Uit dit onderzoek is gebleken dat vooral de distale thermische sensatie een significante voorspeller is van de algehele thermische sensatie. Maar bij Casus A en Casus B is de niet-uniformiteit beperkt en is er geen significant ( $p > 0.68$ , Wilcoxon signed rank test) verschil tussen de distale thermische sensatie en de algehele thermische sensatie. Bij de casussen met een inblaas temperatuur van  $5^{\circ}\text{C}$  en  $-10^{\circ}\text{C}$  ontstaan omgevingscondities bij de voeten waarvan de luchttemperatuur minimaal  $1^{\circ}\text{C}$  lager en de luchtsnelheid minimaal  $0.25\text{ m/s}$  hoger zijn dan in de rest van de ruimte. Uit de thermische sensatie voorspellingen van deze extremere niet-uniforme binnenklimaten blijkt dat de thermische sensatie van de voeten het verschil bepaalt tussen een comfortabele en een oncomfortabele omgeving. Voor niet-uniforme binnenklimaten geldt dus niet per definitie dat het thermisch comfort meer afhankelijk is van het thermisch comfort van lokale lichaamsdelen dan van het hele lichaam. Hiervoor moet namelijk wel een bepaalde mate van niet-uniformiteit in de ruimte aanwezig zijn.

#### 4.4. CONCLUSIE

In deze paragraaf wordt een antwoord gegeven op de verschillende onderzoeksvragen.

##### **2. Wat is de invloed van gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities op het thermisch comfort, de thermische sensatie en de thermofysiologische responsies in een situatie met natuurlijke ventilatie in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem?**

Gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities worden in dit onderzoek gekenmerkt door een lagere wandtemperatuur en een hogere vloertemperatuur ten opzichte van enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities. Door de lagere wandtemperatuur is de gemiddelde stralingstemperatuur per lichaamsdeel lager en ontstaan er verschillen in de (lokale) huidtemperaturen (maximaal  $1^{\circ}\text{C}$ ), die het grootst zijn bij de extremiteiten. Met behulp van Comfort Zones Diagram is er een verschil gevonden voor de lokale en algehele thermische sensatie tussen een situatie met gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities en

enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities. Dit verschil zorgt er echter niet voor dat er ook een verschil gemaakt wordt tussen een comfortabele en oncomfortabele ervaring van de omgeving.

### **3. Hoe kan het thermisch comfort het best voorspeld worden bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem?**

De simulaties van de lokale en algehele thermische sensatie met Comfort Zones Diagram laten zien dat inblaastemperaturen vanaf 5°C mogelijk thermisch comfort problemen kunnen veroorzaken. Volgens de berekende PMV op basis van omgevingscondities is de thermische situatie dicht bij neutraal, terwijl met Comfort Zones Diagram de algehele thermische sensatie op de rand van neutraal zit waarbij de voeten een koude thermische sensatie hebben. De niet-uniformiteit is hier groot genoeg om met behulp van de PMV het thermisch klimaat verkeerd te kunnen voorspellen. Voor extremere niet-uniforme omgevingen, zoals Casus C tot en met F, lijkt een combinatie van ThermoSEM en Comfort Zones Diagram meer potentie te hebben dan NEN-EN-ISO 7730. Wel zouden er van ThermoSEM en Comfort Zones Diagram meer validatiestudies gedaan moeten worden om de betrouwbaarheid voor verschillende niet-uniforme omgevingscondities te verhogen.

## HOOFDSTUK 5

### DISCUSSIE

#### 5.1. RELATIE THERMOFYSIOLOGISCHE RESPONIES, THERMISCH COMFORT EN OMGEVINGSCONDITIES

Uit de resultaten blijkt dat de algehele thermische sensatie significant verklaard kan worden met tocht, de distale huidtemperatuur en de thermische sensatie van alle lichaamsdelen. Volgens Zhang et al. (2010) en Wang et al. (2007) hebben thermisch comfortklachten in gebouwen hoofdzakelijk betrekking op de lichaamsdelen die niet bedekt zijn, zoals het hoofd, de handen (onderdeel van distale huidtemperatuur) en de enkels. Hoewel uit de resultaten blijkt dat de distale huidtemperatuur de thermische sensatie significant kan verklaren wil dat nog niet zeggen dat deze ook een grote invloed heeft op de algehele thermische sensatie bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem. De opzet van de casussen was namelijk een inblaastemperatuur van 16.8°C met wandtemperaturen van 20.1°C en een vloertemperatuur van 25.2°C en een casus met een inblaastemperatuur van 17.5°C met een oppervlaktetemperaturen van 21.6°C. De niet-uniformiteit in deze casussen hebben geen significante thermisch comfortklachten veroorzaakt. Het is daarom interessant om meer proefpersoononderzoeken te doen naar thermisch comfort en fysiologisch respons bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem met een lage inblaastemperatuur, bijvoorbeeld 5°C. Bij deze inblaastemperatuur is de kans op klachten namelijk groter.

Deze verklaringen zijn gevonden met een proefpersoononderzoek dat is uitgevoerd met 10 gezonde mannen tussen de 20 en 30 jaar. Met het onderzoeken van een andere samenstelling van proefpersonen, bijvoorbeeld vrouwen en oudere mannen, moet het duidelijk worden of de gevonden relaties afhankelijk zijn geweest van de samenstelling.

Het thermisch comfort bij natuurlijke ventilatie in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem is per casus beoordeeld over een periode van 2 uur, terwijl in de praktijk mensen voor langere tijd blootgesteld worden aan een thermisch klimaat. Ook is gebleken dat thermisch comfort anders beoordeeld wordt tijdens klimaatkameronderzoeken dan in de praktijk (Kurvers et al., 2002). De resultaten kunnen dus niet rechtstreeks geïnterpreteerd worden voor praktijksituaties.

#### 5.2. INVLOED VAN GECOMBINEERDE NIET-UNIFORME OMGEVINGSCONDITIES

Uit het proefpersoononderzoek is gebleken dat er geen significante verschillen tussen de algehele thermische sensatie is bij gecombineerde en enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities. Tussen de lokale huidtemperaturen is er een significant verschil gemeten van 1.43°C. Uit de variantenstudie is gebleken dat verschillen tussen gecombineerde en enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities resulteren in een verschil in huidtemperatuur van maximaal 1°C bij de handen en voeten. De invloed op de gemiddelde huidtemperatuur is kleiner (maximaal 0.5°C). Het verschil tussen gesimuleerde lichtsnelheden bij gecombineerde en enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem is klein. Het verschil tussen de lichtsnelheden op 0.1m hoogte is maximaal 0.02m/s bij een lichtsnelheid van 0.30 m/s bij inblaastemperaturen van 5°C en -10°C. Het verschil tussen de lichtsnelheid op 0.1m hoogte bij een inblaastemperatuur van 16.8°C en 17.5°C is 0.04m/s bij een lichtsnelheid

van 0.14 m/s. Een ander verschil is dat bij gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities een asymmetrische stralingstemperatuur aanwezig is terwijl bij enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities de temperatuur van alle wanden, de vloer en het plafond gelijk zijn. De stralingstemperatuurasymmetrieën worden gekenmerkt door een lagere wandtemperatuur (20.0°C–23.0°C) en een hogere vloertemperatuur (25.2°C–27.0°C) ten opzichte van enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities. Door de lagere wandtemperatuur is de gemiddelde stralingstemperatuur per lichaamsdeel lager dan voorspeld wordt (conform NEN-EN-ISO 7726). De invloed die een situatie met gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities heeft is hier eerder aan toe te schrijven dan aan andere luchtsnelheden.

Uit Comfort Zones Diagram blijkt dat de lokale en algehele thermische sensatie tussen een situatie met gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities en enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities verschillend is. Deze verschillen zijn echter niet groot genoeg om een verschil te maken tussen een comfortabele en oncomfortabele ervaring van de omgeving.

In dit onderzoek zijn alleen wandtemperaturen tussen de (20.0°C–23.0°C) onderzocht, terwijl in slecht geïsoleerde gebouwen ook lagere wandtemperaturen voorkomen. Deze wandtemperaturen kunnen een veel grotere invloed hebben dan op het thermisch comfort dan met de condities die zijn onderzocht. Daarom is het aan te bevelen ook onderzoek te doen naar situaties met lagere wandtemperaturen.

#### 5.4. VOORSPELLEN THERMISCH COMFORT

Onder de gemeten condities bij het proefpersoononderzoek blijkt dat er geen significant verschil is tussen de PMV en de AMV (een inblaastemperatuur van 16.8°C met wandtemperaturen van 20.1°C en een vloertemperatuur van 25.2°C en een casus met een inblaastemperatuur van 17.5°C met een oppervlaktetemperaturen van 21.6°C). Uit de variantenstudie met Comfort Zones Diagram blijkt dat voor inblaastemperaturen van 5°C en -10°C de algehele thermische sensatie een waarde aanneemt dicht bij neutraal en de thermische sensatie van de voeten in het 'cold but comfortable' gebied ligt. Volgens Nilsson (2004) zal het verschil tussen de thermische sensatie van de voeten en de algehele thermische sensatie voor een oncomfortabele situatie zorgen. Terwijl er gerekend is met een PMV van  $\pm 0$ . De thermische sensatie van de voeten is onder andere voorspeld aan de hand van huidtemperaturen in ThermoSEM. Uit de validatiestudie blijkt dat deze afwijken (RMS=6°C) van de gemeten huidtemperaturen. Het is dus mogelijk dat de voorspelde huidtemperatuur zorgt voor een koudere thermische sensatie van de voeten. Daarom is het aan te bevelen ThermoSEM en Comfort Zones Diagram ook te valideren voor situaties met lagere inblaastemperaturen (bijvoorbeeld 5°C).

Volgens Zang et al. (2010) is het thermisch comfort in niet-uniforme binnenklimaten meer afhankelijk van het thermisch comfort van lokale lichaamsdelen dan van het hele lichaam. Natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem is een voorbeeld van een dergelijke situatie. De PMV is gebaseerd op een warmtebalansvergelijking in uniforme binnenklimaten en volgens Van Oeffelen (2007) en Hellwig et al. is dit geen goede voorspeller van algehele thermische sensatie bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem. Uit het proefpersoononderzoek en de variantenstudie blijkt echter dat de PMV een goede voorspeller van de algehele thermische sensatie is wanneer er geen grote lokale verschillen in luchttemperatuur (tijdens dit onderzoek was dat 0.1°C) en luchtsnelheid (tijdens dit onderzoek was dat 0.1 m/s) zijn. Bij de casussen met een inblaastemperatuur van 5°C en -10°C ontstaan condities bij de voeten waarvan de luchttemperatuur minimaal 1°C lager en de luchtsnelheid minimaal 0.25 m/s hoger zijn dan in de rest van de ruimte. Hier voldoet de theorie van Zang et al. (2010) wel en voldoet de PMV niet zoals Van Oeffelen (2007) en Hellwig et al. beweren.



Uit de variantenstudie blijkt dat de condities waarmee de ventilatielucht de ruimte binnenkomt bepalend zijn voor de werp. Met CFD kunnen lokale luchttemperaturen en lokale luchtsnelheden als gevolg van de werp voorspeld worden. Deze kunnen gebruikt worden om met behulp van ThermoSEM en Comfort Zones Diagram lokale huidtemperaturen en lokale thermisch sensaties te voorspellen. In de praktijk is bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem de toevoerlucht beïnvloedbaar door externe factoren, zoals het drukverschil over de gevel (Jansen, 2007). Hierdoor is het ventilatiedebiet minder controleerbaar in het CFD-model.

Uit paragraaf 5.2 blijken stralingstemperatuurasymmetrieën een grotere invloed op de thermische sensatie en de huidtemperaturen kunnen hebben dan de gemiddelde stralingstemperatuur. In situaties met een lagere wandtemperatuur en een hogere vloertemperatuur is de gemiddelde stralingstemperatuur per lichaamsdeel lager dan de gemiddelde stralingstemperatuur op basis van NEN-EN-ISO 7726. De gemiddelde stralingstemperatuur maakt ook deel uit van de PMV. Het zou kunnen dat de PMV een neutrale thermische sensatie voorspelt op basis van de gemiddelde stralingstemperatuur, maar dat in extremere situaties de temperatuur van de wanden zo laag is dat dit zorgt voor een koude (oncomfortabele) situatie. Daarom is het aan te bevelen de definitie van de gemiddelde stralingstemperatuur te herzien naar een waarde die een (gewogen) gemiddelde is van de stralingstemperatuur van alle lokale lichaamsdelen.



## HOOFDSTUK 6

### CONCLUSIE

De vragen voor dit onderzoek worden hieronder weergegeven en worden geheel of gedeeltelijk beantwoord en gelden voor de onderzochte experimentele condities en voor de onderzochte varianten:

#### **1. Welke thermofysiologische en fysische parameters hebben een significante relatie met de thermische sensatie en het thermisch comfort bij een situatie met natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem?**

De lokale thermische sensatie van alle lichaamsdelen heeft een significante relatie met de algehele thermische sensatie, daarentegen kan het algeheel thermisch comfort niet verklaard worden aan de hand van het lokaal thermisch comfort.

De lokale huidtemperaturen hebben geen significante relatie met de lokale thermische sensatie. Alleen de distale huidtemperatuur (een combinatie van de huidtemperatuur van de handen, de voeten en het hoofd) heeft een significante relatie met de algehele thermische sensatie. Ook de niet-uniforme verdeling van de huidtemperaturen over het lichaam zijn van invloed gebleken. Het verschil tussen proximaal en distaal en het verschil tussen distaal en gemiddeld hebben een significante relatie met de algehele thermische sensatie.

Tocht kan als enige parameter de algehele thermische sensatie significant ( $p < 0.05$ ) verklaren. De distale thermische sensatie en het thermisch comfort van de distale lichaamsdelen kan significant verklaard worden door de luchttemperatuur. Voor het verbeteren van de algehele thermische sensatie bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem is het dus noodzakelijk om tochtklachten in een ruimte weg te nemen en voor een oplossing te kiezen waarbij de afkoeling van de distale huidtemperaturen beperkt blijft.

#### **2. Wat is de invloed van gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities op het thermisch comfort, de thermische sensatie en de thermofysiologische responsies in een situatie met natuurlijke ventilatie in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem?**

Gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities worden in dit onderzoek gekenmerkt door stralingstemperatuurasymmetrieën en tocht. Bij enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities is alleen tocht aanwezig, omdat de wanden, de vloer en het plafond dezelfde stralingstemperatuur hebben.

De stralingstemperatuurasymmetrieën worden gekenmerkt door een lagere wandtemperatuur ( $20.0^{\circ}\text{C} - 23.0^{\circ}\text{C}$ ) en een hogere vloertemperatuur ( $\leq 27.0^{\circ}\text{C}$ ) ten opzichte van enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities. Door de lagere wandtemperatuur is de gemiddelde stralingstemperatuur per lichaamsdeel lager dan voorspeld wordt (conform NEN-EN-ISO 7726) en ontstaan er verschillen in de (lokale) huidtemperaturen (maximaal  $1^{\circ}\text{C}$ ), die het grootst zijn bij de extremiteiten. Met behulp van Comfort Zones Diagram is er een verschil gevonden voor de lokale en algehele thermische sensatie tussen een situatie met gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities en enkelvoudige niet-uniforme omgevingscondities.

De verschillende in stralingstemperatuurasymmetrie, luchttemperatuur, luchtsnelheid en turbulentie-intensiteit zijn echter niet groot genoeg geweest om het verschil te maken tussen een comfortabele en oncomfortabele ervaring van de omgeving. Voor situaties met natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem bij een wandtemperatuur tussen de  $20.0^{\circ}\text{C}$  en  $23.0^{\circ}\text{C}$  hoeft bij het

voorspellen van de thermische sensatie dus niet expliciet rekening gehouden te worden met de invloed van gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities.

### **3. Hoe kan het thermisch comfort het best voorspeld worden bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem?**

Het voorspellen van de lokale lucht- en warmtestromingen geeft voor een situatie met natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem meer informatie over de werp. Uit de variantenstudie is gebleken dat bij lage inblaastemperaturen ( $5^{\circ}\text{C}$  en  $-10^{\circ}\text{C}$ ) de luchtsnelheden bij de vloer hoger zijn en de luchttemperatuur lager dan de gemiddelde luchtsnelheid en luchttemperatuur. Bij hogere inblaastemperaturen ( $16.8$  en  $17.5^{\circ}\text{C}$ ) is het verschil tussen de inblaas- en omgevingstemperatuur kleiner waardoor de zwaartekracht minder invloed heeft en de lucht zich beter kan mengen met de omgevingslucht voordat de werp in de buurt van de thermische manikin kan komen. Dit resulteert in een redelijk uniforme luchttemperatuur en luchtsnelheden die nabij de vloer hoger zijn. Tijdens het proefpersoononderzoek is de PMV een goede voorspeller geweest van de algehele thermische sensatie (inblaastemperatuur  $\geq 16.8^{\circ}\text{C}$ ).

De simulaties van de lokale en algehele thermische sensatie met Comfort Zones Diagram laten zien dat inblaastemperaturen lager dan  $5^{\circ}\text{C}$  thermisch comfort problemen kunnen veroorzaken. Volgens de berekende PMV op basis van omgevingscondities is de thermische situatie van mensen zo goed als neutraal. Comfort Zones Diagram voorspelt de algehele thermische sensatie op de rand van neutraal en de voeten met een koude thermische sensatie, dat samen resulteert in een oncomfortabele situatie. De niet-uniformiteit is hier dus groot genoeg om met behulp van de PMV de thermische sensatie te warm te kunnen voorspellen. Voor situaties met natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsysteem lijkt bij lagere inblaastemperaturen (lager dan  $5^{\circ}\text{C}$ ) een combinatie van ThermoSEM en Comfort Zones Diagram meer potentie te hebben voor het voorspellen van de thermische sensatie dan NEN-EN-ISO 7730.

## HOOFDSTUK 7

### AANBEVELINGEN

#### 7.1. VOORSPELLEN VAN THERMISCHE SENSATIE BIJ NATUURLIJKE VENTILATIETOEOVER IN COMBINATIE MET EEN LAAG TEMPERATUUR VERWARMINGSSYSTEEM

De thermische sensatie bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem is afhankelijk van de lokale thermische sensatie en distale huidtemperaturen als gevolg van lokale luchttemperaturen en luchtsnelheden. Lokale fysische condities zijn afhankelijk van de worp die ontstaat als gevolg van de condities bij de inlaat (luchttemperatuur en ventilatiedebiet). Hoge inblaastemperaturen ( $\geq 16.5^{\circ}\text{C}$ , bij het gebruikte rooster) zullen zich dichter bij de inlaat mengen met de omgevingslucht dan lagere inblaastemperaturen ( $\leq 5.0^{\circ}\text{C}$ ), omdat als gevolg van een groter temperatuur verschil tussen inblaaslucht en omgevingslucht de zwaartekracht een grotere rol heeft. Bij lagere inblaastemperaturen is de niet-uniformiteit dus groter en is het aan te bevelen het thermisch comfort te onderzoeken met een methode die de lokale thermische sensatie ook mee kan nemen. Dit kan Comfort Zones Diagram zijn in combinatie met CFD en ThermoSEM. De thermische sensatie bij hogere inblaastemperaturen kunnen beoordeeld worden met de PMV.

#### 7.2. AANBEVELINGEN VOOR DE UITVOERING VAN HET ONDERZOEK

Om betrouwbaardere conclusies te trekken uit de statistische analyse zal het onderzoek uitgevoerd moeten worden met meer proefpersonen. Om het representatief te maken voor een grote bevolkingsgroep dienen ook verschillende groepen proefpersonen mee te werken, zoals vrouwen, oudere mannen of mensen met overgewicht. Hierdoor kan het ook mogelijk zijn om relaties te vinden met behulp van lineaire of meervoudige regressieanalyse, zodat op basis van een empirische vergelijking met bijvoorbeeld fysische condities en huidtemperaturen de thermische sensatie voorspeld kan worden.

Voor het vergelijken van verschillen tussen de casussen dienen de randvoorwaarden van de casussen gelijk te worden gehouden. Tijdens dit onderzoek was de inblaastemperatuur verschillend gebleken ( $\Delta T = 0.7^{\circ}\text{C}$ ) voor Casus A en Casus B. Uit de kalibratiemetingen is gebleken dat bij Casus A de worp richting het plafond gaat (coandă-effect) terwijl bij Casus B de worp op de proefpersoon gericht is. Het is dus niet duidelijk of de verschillen in fysische condities door de worp of door de stralingstemperatuurassymetrieën zijn ontstaan en wat het effect van deze fysische condities op het thermisch comfort is. Het verplaatsen van de regelsensor direct bij het toevoerrooster kan dit probleem doen verminderen.

Tijdens de kalibratiemetingen is gebleken dat onder de opgelegde condities er luchtsnelheidsfluctuaties voorkomen met een duur van 5 tot 10 minuten. Uitgaande van een stabiele en niet-stationaire situatie is het aan te bevelen om bij kalibratiemetingen eerst een testmeting te doen waarin ook op dit soort luchtsnelheidsfluctuaties wordt gelet. Vervolgens moet er een meetperiode aangehouden worden waarin meerdere fluctuaties kunnen voorkomen, zodat de invloed van deze fluctuaties op de gemiddelde luchtsnelheid wordt meegenomen.

### 7.3. AANBEVELINGEN VOOR VERVOLGONDERZOEK

De verschillen tussen de casussen bleken klein en de niet-uniformiteit in de ruimte bleek niet extreem genoeg om klachten te kunnen veroorzaken. Hierdoor zijn de verschillen in fysiologisch respons en thermische comfort klein en zijn er geen grote verschillen gemeten tussen de AMV en de PMV. Het is daarom interessant om meer proefpersoononderzoeken te doen naar thermisch comfort en fysiologisch respons bij natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsstelsel met een lage inblaastemperatuur, bijvoorbeeld 5°C.

Er moet meer onderzoek komen naar het beoordelen van gecombineerd lokaal thermisch discomfort met NEN-EN-ISO 7730 bij natuurlijke ventilatie in combinatie met een laag temperatuur verwarmingsstelsel. Het meest aantal ontevreden wordt voorspeld met de Draught Rate en het is bijvoorbeeld niet duidelijk of mensen ontevredener zijn over tocht wanneer er ook stralingstemperatuurasymmetrieën optreden.

Het is aan te bevelen de gevoeligheid van de thermische sensatie voor asymmetrische stralingstemperaturen te onderzoeken bij PMV=0 of bij een vaste operationele temperatuur. Hierdoor zou duidelijk moeten worden of de definitie van de gemiddelde stralingstemperatuur in NEN-EN-ISO 7726 de meest geschikt is of dat dit bijvoorbeeld herzien moet worden naar een waarde die een (gewogen) gemiddelde is van de stralingstemperatuur van alle lokale lichaamsdelen.

## BRONVERMELDING

- Baarda, D.B., Goede, M.P.M., de., 2006. Basisboek Methoden en Technieken – Handleiding voor het opzetten en uitvoeren van kwantitatief onderzoek. Wolters-Noordhoff, Groningen | Houten.
- Blocken, B.J.E., Loomans, M.G.L.C., 2008. Introduction to CFD in building engineering. College sheets, Eindhoven University of Technology
- Boerstra, A.C., Veld, P., Op 't., Eijdens, H., 2000. The health, safety and comfort advantages of low temperature heating systems: a literature review. Healthy Buildings Conference, august 2000.
- Boerstra, A.C., 2006. Balansventilatie: wat kan en wat moet anders? ISSO ThemaTech september 2006, 10-11.
- Cleemments-Croome D.I., 2006. Creating the productive workplace. Taylor en Francis Group, 2e druk, Londen.
- Ellis, P.D., 2010. The Essential Guide to Effect Sizes: An Introduction to Statistical Power, Meta-Analysis and the Interpretation of Research Results.
- Engel, P.J.W., van der, 1995. Thermisch comfort en ventilatie-efficiency door inducerende ventilatie via de gevel. PhD-thesis Technische Universiteit Delft.
- Fiala, D., 1998. Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort. PhD thesis, De Montfort University Leicester.
- Field, A., 2009. Discovering statistics using SPSS : (and sex and drugs and rock 'n' roll). Sage, London.
- Fanger, P.O., 1972. Thermal comfort. McGraw-Hill Book Co., New York.
- Fanger, P.O., 1977. Local discomfort to the human body caused by non-uniform thermal environments. Ann. Occup. Hyg., No. 20., 285-291.
- Fluent Inc., 2006. Fluent 6.3 User's Guide. Fluent Inc., Lebanon.
- Van Harten, M., 2010. Natuurlijke ventilatietoever in combinatie met een laag temperatuur verwarmingssysteem – een voorbereidende studie voor een onderzoek naar de invloed van gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities op het thermisch comfort. Intern rapport, Technische Universiteit Eindhoven.
- Hardy, J.D., Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J., 1970. Physiological and behavioral temperature regulation, Thomas Springfield.
- Honeywell, 2011. <http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/humiditymoisture/lit.htm>, laatst bezocht op 29-03-2011.

- Hoogervorst, C., 2009. De energieneutrale wijk in Nederland – Onderzoek naar de haalbaarheid van een collectief warmtepompsysteem in een energieneutrale wijk in Nederland. MSc-Thesis, Technische Universiteit Eindhoven.
- Heijden, M.G.M., 2010. Heat and smoke removal in semi open car parks: an assessment of the fire-safety level when designed using current guidelines on bases of worst case scenarios and wind effects. MSc thesis Eindhoven University of Technology
- Hellwig, R.T., Brasche, S., Bischof, W. Thermal Comfort in Offices – Natural Ventilation vs. Air Conditioning.
- Hsieh, K.J., Lien, F.S., 2004. Numerical modeling of buoyancy-driven turbulent flows in enclosures. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 25,659-670.
- Isaksson, C., Karlsson, F., 2006. Indoor climate in low-energy houses – an interdisciplinary investigation. *Building and Environment*, No. 41, 1678 – 1690.
- Jacobs, P., Knoll, B., Phaff, H., 2009. Luchtverversing en temperatuurbeheersing in scholen – tochtvrij natuurlijke toevoer in klaslokalen vanaf 180 cm hoogte? *Bouwfysica* 4, 2009.
- Jansen, D.W.L., 2007. Boundary conditions for natural supply ventilation : measurements and simulations of the initial jet region. MSc thesis, Eindhoven University of Technology.
- Jiang, Y., Allocca, C., Chen, Q., 2004. Validation of CFD simulations for natural ventilation. *International Journal of Ventilation*, 2(4), 359-370.
- Jiang, Z. and Chen, Q. 2009. Air Distribution Effectiveness with Stratified Air Distribution Systems. Final Report ASHRAE Research Project (RP-1373). ASHRAE. Atlanta (pp.100-101)
- Kildesø J., Wyon D.P., Skov T., Schneider T. , 1999. Visual analogue scales for detecting changes in symptoms of the sick building syndrome in an intervention study. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, vol. 25, pp. 361-367.
- Kurvers, S.R., Boerstra, A.C., Raue, A.K., Linden, A.C., van der, Notenboom, A.M.J., 2002. Thermische behaaglijkheid als gebouwprestatie. Literatuuronderzoek naar recente wetenschappelijke ontwikkelingen. TU-Delft, faculteit Civiele techniek en Geowetenschappen en ISSO.
- Lean M.E.J., Hans, T.S., Morrison, C.E., 1995. Waist circumference as a measure for indicating need for weight management. *British Medical Journal*, vol. 311, pp. 158-161.
- Loomans, M.G.L.C., 1997. Design of and discussion on a thermal mannequin. FAGO-report 97.16.K, Eindhoven University of Technology.
- Loomans, M.G.L.C., 1998. The measurement and simulation of indoor air flow. PhD thesis, Eindhoven University of Technology.
- Loomans, M.G.L.C., Schijndel, A.W.M. van, 2002. Simulation and measurement of the stationary and transient characteristics of the hot sphere anemometer. *Building and Environment*, 37(2), 153-163.



- Loomans, M.G.L.C., 2007. Grid dependency of wall heat transfer for simulation of natural convection flow problems. In O. Seppänen & J. Säteri (Eds.), Proceedings of the SCANVAC Roomvent 2007 Conference, 13-15 June 2007, Helsinki, Finland. Helsinki, Finland: Finvac.
- Van Marken Lichtenbelt W.D., Frijns A.J.H., Van Ooijen M.J., Fiala D., Kester A.M., Van Steenhoven A.A., 2007. Validation of an individualized model of human thermoregulation for predicting responses to cold air. *International Journal of Biometeorology*, Vol.51, pp 169-179.
- Van Marken Lichtenbelt, W.D., Daamen, H.A.M, Wouters, L., Fronczek, R., Raymann, R.J.E.M., Severens, N.M.W., Someren, E.J.W. van (2006). Evaluation of wireless determination of skin temperature using iButtons. *Physiology & Behavior*, vol. xx, pp. xxx-xxx.
- Mayer, E., 1987. Physical causes for draught: Some new findings. *ASHRAE Transactions* (93), 540-543.
- McCullough E.A., Jones B.W., Tamura T. (1989). A database for determining the evaporative resistance of clothing. *ASHRAE Transactions*, vol. 95, pp. 316-328.
- McCullough E.A., Olesen B.W., Hong S., 1994. Thermal insulation provided bij chairs. *ASHRAE Transactions*, vol. 100, pp. 795-802.
- Myhren, J.E., Holmberg, S., 2008. Flow patterns and thermal comfort in a room with panel, floor and wall heating. *Energy and Buildings*, No. 40., 524-536.
- Nakamura, M., Yoda, T., Crawshwa, L. I., Yasuhara, S., Saito, Y., Kasuga, M., Nagashima, K., Kanosue, K., 2008. Regional differences in temperature sensation and thermal comfort in humans. *J. Appl. Physiol*, No. 105, 1897-1906.
- NEN-EN-ISO 7726, 1998. Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities. International organization for standardization, Genève.
- NEN-EN-ISO 7730, 2005. 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. European committee for standardization, Brussel.
- NEN-EN-ISO 9886, 2004. Ergonomics – Evaluation of thermal strain by physiological measurements. International Standards Organization, Geneva.
- NEN-EN-ISO 9920, 2007. Ergonomics of the thermal environment – Estimation of thermal insulation and water vapor resistance of clothing ensemble. International Standards Organization, Geneva.
- NEN-EN-ISO 10551, 1995. Ergonomics of the thermal environment – Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgment scales. International Standards Organization, Geneva.
- NEN-EN 15377-1:2008. Heating systems in buildings – Design of embedded water based surface heating and cooling systems – Part 1: Determination of the design heating and cooling capacity. European committee for standardization (CEN).

- Nilsson, H.O., 2004. Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models. Department of Civil and Architectural Engineering Royal Institute of Technology, Sweden. Department of Technology and Built Environment University of Gävle, Sweden.
- Van Oeffelen, E.C.M., 2007. Thermisch comfort bij toepassing van een ventilatiesysteem met natuurlijke toevoer in combinatie met een lage temperatuur verwarming. Onderzoek met proefpersonen onder laboratoriumomstandigheden en toepassing van een thermofysiologisch model.
- Olesen, B.W., Parsons, K.C., 2002. Introduction to thermal comfort standard and to the proposed new version of EN ISO 7730. Energy and Buildings, No. 34 (6), 537-548.
- Passivhaustagung, 2011. [www.passivhaustagung.de/Passive\\_House\\_E/comfort\\_passive\\_house.htm](http://www.passivhaustagung.de/Passive_House_E/comfort_passive_house.htm), laatst bezocht op 6-11-2011.
- Parsons, K.C., 2003. Human Thermal environments: the effect of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance. Second edition, Taylor & Francis group, Londen.
- Prendergast, E., Erdtsieck, P., 2004. Lage temperatuur verwarming i.c.m. natuurlijke ventilatie – Haalbaarheidstudie naar comfort, energiebesparing en terugverdientijd. Een rapport van Mobius consult in opdracht van Alusta b.v. en Kodi b.v.
- Rees, S.J., McGuirk, J.J., Haves, P., 2001. Numerical investigation of transient buoyant flow in a room with displacement ventilation and chilled ceiling system. International Journal of Heat and Mass Transfer 44 (2001), pp 3067-3080.
- Richter, W., 2007. Zur bewertung bau- und anlagentechnischer lösungen aus wärmephysiologischer sicht. Proceedings of the 12th symposium for building physics, Dresden.
- Roijen, E.J.A., Beerens, B., 2009. EOS Demo innovatieve ventilatiesystemen – Klimaatonderzoek thermisch comfort decentrale luchttoevoer bij LTV. Een rapport van Cauberg-Huygen raadgevende ingenieurs b.v. in opdracht van SenterNovem.
- Santamouris, M. (ed), 2006. Environmental design of urban buildings. Earthscan, UK.
- Schellen, L., Loomans, M.G.L.C., Marken Lichtenbelt, W. van, Frijns, A.J.H. & Wit, A.P. (2010). Assessment of thermal comfort in relation to applied low exergy systems - The design of a climate chamber and the use of a thermophysiological model. Proceedings of Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort.
- Sørensen, D.N., Voigt, L.K., 2003. Modeling flow and heat transfer around a seated human body by computational dynamics. Build Environment 2003, 38, 753-762.
- Stamoe, A., Katsiris, I. 2006. Verification of a CFD model for indoor airflow and heat transfer. Building and Environment, No. 41, 1171 – 1181.
- Stichting LTV, 2011. <http://www.passiefbouwen.nl/stichting-ltv/templates/ltv/global/index.php>, laatst bezocht op 6 april 2011.

- Toftum, J., 2002. Human responses to combined indoor environment exposures. *Energy and Buildings*, No. 34, 601-606.
- Vries, G. de, Silvester, S., 2000. *Bewonerservaringen lage temperatuursystemen*. V&L Consultants, TU Delft, i.o.v. Novem.
- Wang D., Zhang H., Arens E., Huizenga C., 2007. Observations of upper-extremity skin temperature and corresponding overall-body thermal sensations and comfort. *Building and Environment*, vol. 42, issue 12, pp. 3933-3943.
- West, B. T., Welch, K.B., Galecki, A.T., Gillespie, B.W., 2007. *Linear mixed models: a practical guide using statistical software*. London: Chapman & Hall/CRC.
- Yoon, Y.J., Park, S.D., Sohn, J.Y., 1992. Optimum comfort limits determination through the characteristics of asymmetric thermal radiation in a heated floor space, "Odol". *Ann. Physiol. Anthropol.*, No. 11(5), 517-522.
- Zhang, Z., Zhang, W., Zhai, Z.J., Chen, Q.Y., 2007. Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part 2 – Comparison with experimental data from literature.
- Zhang, H., Arens, E., Huizenga, C., Han, T., 2010. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts. *Building and Environment*, No 45, 380-388.
- Zhang, Y., Zhao, R., 2009. Relationship between thermal sensation and comfort in non-uniform and dynamic environments. *Building and Environment*, No 44, 1386-1391.



# **BIJLAGE 1**

## THERMOFYSIOLOGISCHE ONDERZOEKSKAMER



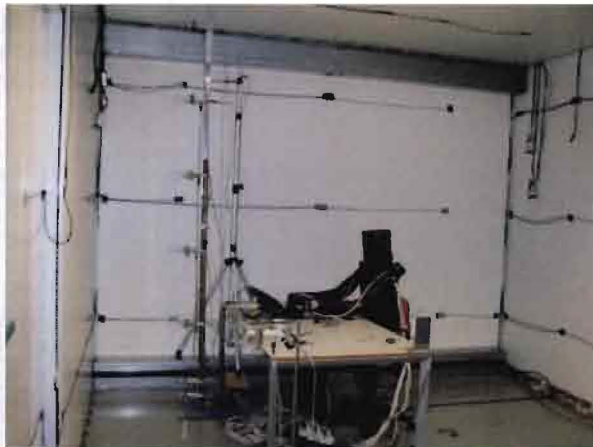
## Beschrijving thermofysiologische onderzoekskamer

De thermofysiologische onderzoekskamer is een in pandige ruimte dat is gelegen in het laboratorium van de unit Building Physics and Systems van de faculteit Architecture, Building and Planning aan de Technische Universiteit Eindhoven.

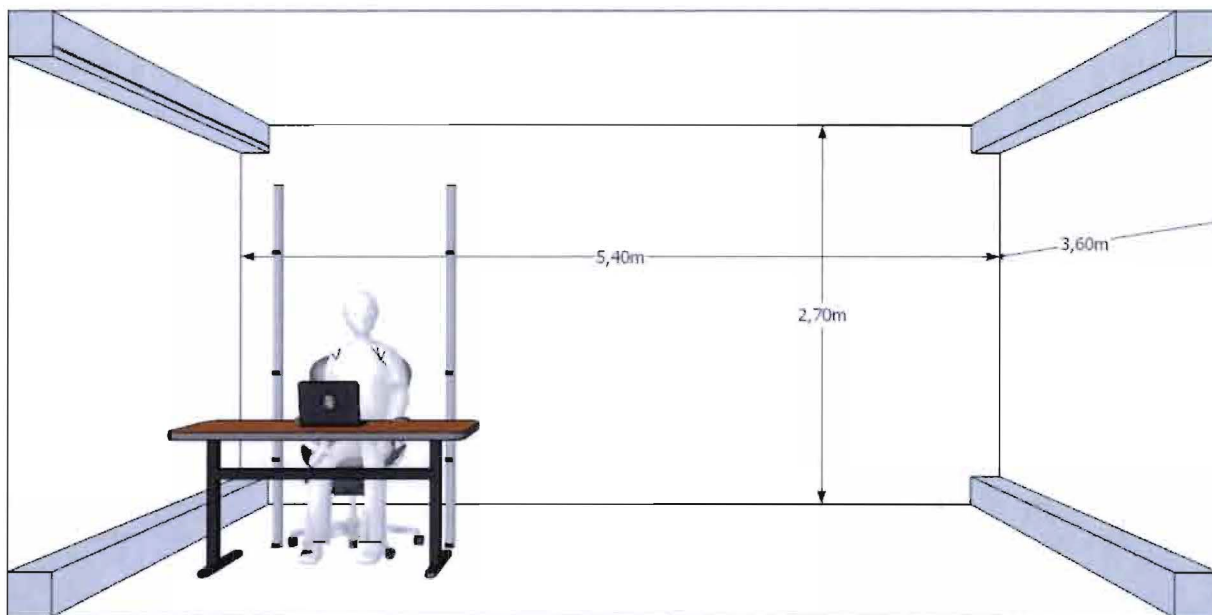
De onderzoekskamer is gebouwd in een goed geïsoleerde ruimte (een koelcel) en heeft inwendige afmetingen die gelijk zijn aan een standaard kantoor vertrek, namelijk  $3.6 \times 5.4 \times 2.7 \text{ m}^3$  (lxbxh), zie figuur B1.3. In de ruimte zijn geen ramen aanwezig, waardoor visueel contact met buiten niet mogelijk is.



**Figuur B1.1.** Exterieur onderzoekskamer met de aansluitingen van het ventilatie- en verwarmingssysteem



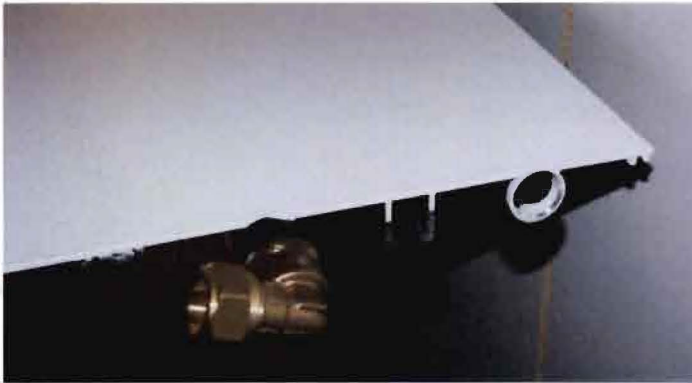
**Figuur B1.2.** Interieur onderzoekskamer



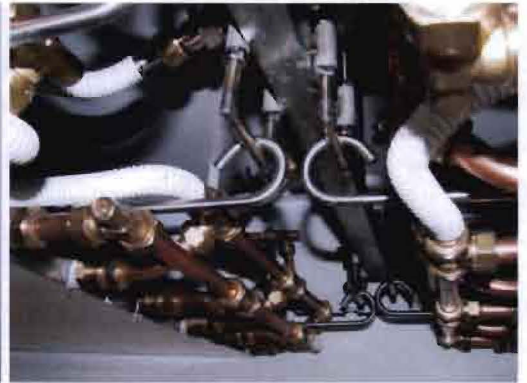
**Figuur B1.3.** Afmetingen onderzoekskamer

## Klimaatinstallatie

De oppervlakken binnen in de kamer zijn volledig voorzien van stralingspanelen die verwarmd of gekoeld kunnen worden door middel van water. Deze panelen bestaan uit een geëxtrudeerd en geanodiseerd aluminiumprofiel, zie figuur B1.3, die onder zijn opgebouwd uit een geleidingsplaat met daarachter ronde buizen voor het transport van water (Schellen, 2010). De stralingspanelen kunnen per oppervlak (wand, vloer, of plafond) aangesloten worden op het warm- of op het koudwatercircuit, zie figuur B1.4. Ieder watercircuit kan slechts gecontroleerd worden voor één temperatuur (waarbij het minimale bereik van het koudwatercircuit afhankelijk is van de capaciteit van de aquifer van de universiteitscampus en het maximale bereik van het warmwatercircuit afhankelijk is van het vermogen van de boiler met elektrische naverwarmen ( $\pm 35^\circ\text{C}$ ). De kamer is controleerbaar voor maximaal twee verschillende oppervlaktetemperaturen, doordat er slechts één koud- en één warmwatercircuit aanwezig is. De mogelijkheid bestaat om maximaal zes oppervlakken op één circuit aan te sluiten.

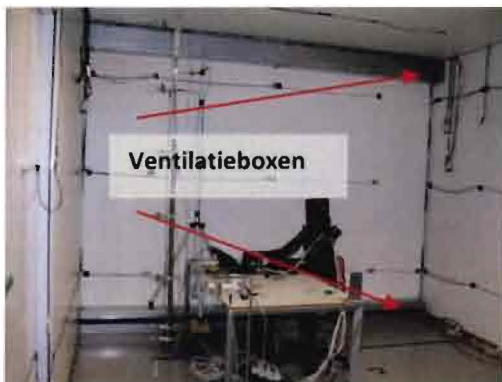


**Figuur B1.3.** Aluminium profielen inclusief knelkoppeling



**Figuur B1.4.** Verbinding panelen met het watercircuit (locatie: plafond)

De onderzoekskamer kan door middel mengventilatie of verdringingsventilatie geventileerd worden. Aan de korte zijden van de onderzoekskamer bevinden zich vier mengboxen ( $3.6 \times 0.2 \times 0.2 \text{ m}^3$  (lxbxh)) (zie figuur B1.5 en figuur B1.6), die voor zowel de toevoer als de afvoer van de ventilatielucht gebruikt kunnen worden. Voor dit onderzoek is alleen gebruik gemaakt van mengventilatie, waarbij zowel de toevoer als de afvoer zich boven in de ruimte bevinden. Het maximale ventilatie-debiet dat in de ruimte gebracht kan worden is  $612 \text{ m}^3/\text{uur}$ , maar is voor dit onderzoek teruggebracht naar  $\pm 100 \text{ m}^3/\text{uur}$ . Voor de mengboxen bevindt zich een custom made rooster met een maasgrootte van  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ . De inblaasttemperatuur kan geregeld worden met behulp van de aquifer van de universiteitscampus (koelen) of met behulp van een boiler met elektrische naverwarmen (verwarmen) Schellen (2010). De relatieve luchtvochtigheid (RV) kan naar wens geregeld worden, maar voor dit onderzoek is een RV van 40% aangehouden. Dit niveau wordt namelijk als comfortabel ervaren (ASHRAE, 2004) Meer gespecificeerde informatie is te vinden in Schellen (2010).



**Figuur B1.5.** Positionering ventilatieboxen



## **BIJLAGE 2**

### FYSISCH EN THERMOFYSIOLOGISCHE SENSOREN



## LUCHTTEMPERATUUR BIJ DE INLAAT EN IN HET VELD

De luchttemperatuur is gemeten met behulp van een NTC-U-thermistor. Dit is een weerstand met een negatieve temperatuurcoëfficiënt, waarbij de elektrische weerstand afneemt bij toenemende temperaturen. Met behulp van een Steinhart-Hart functie (vergelijking B2.1) kan de gemeten weerstand omgezet worden in een temperatuur. Bij het meten van de luchttemperatuur is het belangrijk om invloeden van straling uit te sluiten. Daarom worden er stralingskapjes om de NTC-U-thermistors geplaatst. Het nadeel is dat deze een relatief grote omvang hebben en een mogelijke invloed hebben op de luchtstroming. Bij het positioneren van de NTC-U-thermistors op het statief is er voor gezorgd dat deze sensoren zich niet in het directe stromingsveld van de luchtsnelheidsensoren zitten, zie figuur B2.1. In tabel B2.1 zijn de gegevens van de specifieke luchttemperatuursensoren terug te vinden.

$$T = \frac{1}{A + B(\ln(R_t) + C(\ln(R_t))^3)} - 273.15 \quad [B2.1]$$

$T$	=	Temperatuur	[°C]
$A, B, C$	=	Richtingscoëfficiënt bepaald op basis van kalibratie	
$R_t$	=	Gemeten weerstand	[Ω]

**Tabel B2.1.** Gegevens luchttemperatuursensoren

Id nr. Tu/e	Type sensor	Onnauwkeurigheid NEN-EN-ISO 7726	Onnauwkeurigheid fabrikant	Positie comfort metingen	Positie gridmetingen
1321	NTC	0.5°C	0.2°C	-	1.1m
1322	NTC	0.5°C	0.2°C	Inlaat	Inlaat
1323	NTC	0.5°C	0.2°C	Links 0.6m	2.6m
1324	NTC	0.5°C	0.2°C	Rechts 0.1m	0.1m
1325	NTC	0.5°C	0.2°C	Rechts 0.6m	0.6m
1326	NTC	0.5°C	0.2°C	Rechts 1.1m	-
2171	NTC	0.5°C	0.2°C	Rechts 1.7m	1.6m
2172	NTC	0.5°C	0.2°C	Links 0.1m	Referentiepunt
2173	NTC	0.5°C	0.2°C	Links 0.6m	-
2175	NTC	0.5°C	0.2°C	Links 1.1m	2.1m

## RELATIEVE LUCHTVOCHTIGHEID

De relatieve luchtvochtigheid (RV) is gemeten met behulp van capacatieve hygrometer, van het type HiH-4000 van Honeywell. Afhankelijk van de hoeveelheid vocht in de lucht vindt er in de sensor een bepaalde maten van elektrische geleiding plaats, waardoor er een elektrische capaciteit met een bepaalde variatie kan worden vastgesteld. Hoe groter de vastgestelde capaciteit, hoe hoger de relatieve luchtvochtigheid is (Honeywell, 2011). In tabel B2.2 zijn de gegevens van de specifieke relatieve luchtvochtigheidsensoren terug te vinden.

**Tabel B2.2.** Gegevens relatieve luchtvochtigheidsensoren

Id nr. Tu/e	Type sensor	Onnauwkeurigheid NEN-EN-ISO 7726	Onnauwkeurigheid fabrikant	Positie comfort metingen	Positie gridmetingen
1321	HiH-4000	-	2%	-	1.1m
1322	HiH-4000	-	2%	Inlaat	Inlaat
1323	HiH-4000	-	2%	Links 0.6m	2.6m
1324	HiH-4000	-	2%	Rechts 0.1m	0.1m
1325	HiH-4000	-	2%	Rechts 0.6m	0.6m
1326	HiH-4000	-	2%	Rechts 1.1m	-
2171	HiH-4000	-	2%	Rechts 1.7m	1.6m
2172	HiH-4000	-	2%	Links 0.1m	Referentiepunt
2173	HiH-4000	-	2%	Links 0.6m	-
2175	HiH-4000	-	2%	Links 1.1m	2.1m

## LUCHTSNELHEID BIJ DE INLAAT EN IN HET VELD

De luchtsnelheid is gemeten met behulp van een lage snelheid hete bol anemometer van de firma Dantec. De lage snelheid hete bol anemometer bestaat uit twee bollen van glas (waarvan één verwarmde sensor en één onverwarmde sensor) die zijn afgewerkt met behulp van een dunne laag nikkel, zie figuur B2.1. De bollen zijn onderdeel van een elektrisch circuit dat voorzien is van een brug van Wheatstone. De werking van deze vrug is gebaseerd op het feit dat er geen spanning over deze brug gemeten mag worden. Deze brug is in balans wanneer één sensor is verwarmd met een temperatuur die 30°C hoger is dan de temperatuur die wordt gemeten bij de onverwarmde sensor. Onder verschillende snelheidscondities varieert de warmteoverdracht van de verwarmde sensor en daardoor dus ook de temperatuur van de sensor en de elektrische weerstand. Een elektronisch feedback systeem corrigeert de balans in de burg met een bepaalde spanning [V]. Deze spanning correleert met de gemeten luchtsnelheid van de stroming (Loomans et al., 2002). De luchtsnelheid wordt over een frequentie van 10 Hz gemeten en uitgemiddeld naar een waarde per minuut. In de rest van dit rapport wordt de lage snelheid hete bol anemometer aangeduid met 'Dantec'. In tabel B2.3 zijn de gegevens van de specifieke luchtsnelheidsensoren terug te vinden.

**Tabel B2.3.** Gegevens luchtsnelheidsensoren

Id nr. Tu/e	Fabrikant	Onnauwkeurigheid NEN-EN-ISO 7726	Onnauwkeurigheid (Loomans, 1998)	Positie comfort metingen	Positie gridmetingen
106	Dantec	0.5 + 0.05V <sub>a</sub>	10%	-	1.1m
1704	Dantec	0.5 + 0.05V <sub>a</sub>	10%	Inlaat	Inlaat
114	Dantec	0.5 + 0.05V <sub>a</sub>	10%	Links 0.6m	2.6m
104	Dantec	-0.5 + 0.05V <sub>a</sub>	10%	Rechts 0.1m	0.1m
105	Dantec	-0.5 + 0.05V <sub>a</sub>	10%	Rechts 0.6m	0.6m
106	Dantec	-0.5 + 0.05V <sub>a</sub>	10%	Rechts 1.1m	-
109	Dantec	-0.5 + 0.05V <sub>a</sub>	10%	Rechts 1.7m	1.6m
110	Dantec	-0.5 + 0.05V <sub>a</sub>	10%	Links 0.1m	Referentiepunt
111	Dantec	-0.5 + 0.05V <sub>a</sub>	10%	Links 0.6m	-
113	Dantec	-0.5 + 0.05V <sub>a</sub>	10%	Links 1.1m	2.1m



**Figuur B2.1.** V.L.N.R. positionering sensoren, Relatieve luchtvochtigheid (boven) en luchttemperatuur sensoren (onder), luchtsnelheidsensor.

### OPPERVLAKTETEMPERATUUR

De oppervlaktetemperatuur is gemeten met behulp van NTC-U-thermistors, die zich op een koperen plaatje bevindt, zie figuur B2.2. De werking van deze oppervlaktetemperatuursensoren is dezelfde als de luchttemperatuursensoren. In figuur B2.3 per oppervlak de gepositioneerde id-nummers weergegeven.



**Figuur B2.2.** Oppervlaktetemperatuur sensor (NTC-U-thermistor)

**Wand-oost**

2002	2005	2008
2003	2006	2009
2004	2007	2010

**Wand-noord**

2029	2032	2035
2030	2033	2036
2031	2034	2037

**Wand-west**

2011	2014	2017
2012	2015	2018
2013	2016	2019

**Plafond**

2038	2041	2044
2039	2042	2045
2040	2043	2046

**Wand-zuid**

2020	2023	2026
2021	2024	2027
2022	2025	2028

**Vloer**

2067	2070	2073
2068	2071	2074
2069	2072	2075

**Figuur B2.3.** Positionering id-nummers oppervlaktetemperatuursensoren

### GEMIDDELDE STRALINGSTEMPERATUUR

De gemiddelde stralingstemperatuur is berekend met behulp van NEN-EN-ISO 7726 aan de hand van de gemeten oppervlaktetemperaturen. De gemiddelde stralingstemperatuur is een gewogen waarde voor de stralingstemperatuur uit alle richtingen, waarbij de positie van de mens centraal staat (Parsons, 2003). De

bijdrage van een stralingsvlak wordt meegenomen door het gemiddelde van de stralingstemperatuur van een oppervlak te vermenigvuldigen met een factor voor de zogeheten kijkhoeken. De methode voor het berekenen van de gemiddelde stralingstemperatuur staat beschreven in NEN-EN-ISO 7726 (2001). Bij dit onderzoek is als uitgangspunt de methode voor een zittend persoon genomen.

## TURBULENTIE-INTENSITEIT

De turbulentie-intensiteit is de mate waarin de momentane lichtsnelheid fluctueert (Mayer, 1987) en heeft invloed op de sensatie van tocht. De turbulentie-intensiteit (TU) kan gedefinieerd met behulp van vergelijking B2.2 (NEN-EN-ISO 7726). De standaardafwijking (SD) wordt hierbij bepaald aan de hand van de spreiding van de lichtsnelheid per seconde over een interval van één minuut. Dit gemiddelde van dit interval is  $v_a$ .

$$TU = \frac{SD}{v_a} \quad [B2.2]$$

## VERTICALE TEMPERATUURGRADIËNT

De verticale temperatuurgradiënt, conform NEN-EN-ISO 7730, is het verschil tussen de gemeten temperatuur op enkel- (0.1m) en op hoofdhoogte (1.1m) .

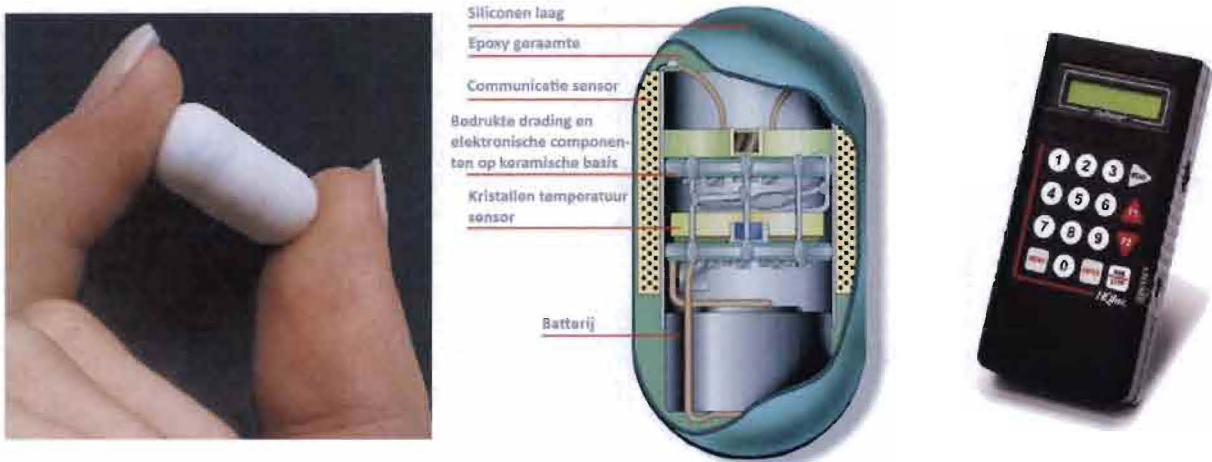
## STRALINGSTEMPERATUUR ASYMMETRIE

Stralingstemperatuur asymmetrie is het verschil in stralingstemperatuur tussen twee tegen over elkaar gelegen vlakken (verschil in plane radiant temperature) en kan ontstaan door de aanwezigheid van eenzijdig warmere of koudere oppervlakken (Fanger, 1977). De 'plane radiante temperature' is een gewogen waarde die berekend wordt berekend aan de hand van de gemeten oppervlaktetemperaturen van de ruimte vermenigvuldigd met een factor voor de kijkhoek tussen een oppervlak en de rest van de omhullende oppervlakken in de ruimte . De kijkhoek is afhankelijk van de grootte van de omhullende oppervlak en de relatieve positie van de persoon tot een bepaald oppervlak. De 'plane radiant temperature' wordt berekend aan de hand van een methode beschreven in NEN-EN-ISO 7726. De stralingstemperatuur asymmetrie is alleen berekend voor het verschil in stralingstemperatuur tussen plafond en de vloer, omdat het verschil tussen beide cases wordt gekenmerkt door een verhoogde vloertemperatuur en hierdoor tussen beide cases verschillende stralingstemperatuurasyymetrieën berekend kunnen worden.

## KERNTEMPERATUUR

De kerntemperatuur is gemeten met behulp van een CorTemp capsule, zie figuur B2.3. Dit is een ¾ inch capsule die is ontwikkeld om via het spijsverteringsstelsel de inwendige temperatuur van de mens te meten. Na het innemen van de capsule duurt het ongeveer een uur voordat de sensor zich in dat deel van het spijsverteringsstelsel bevindt dat het een betrouwbare waarde afgeeft voor een gemiddelde kerntemperatuur. Deze kerntemperatuur wordt in de sensor gemeten met behulp van een kwarts kristallen temperatuur sensor, die op bepaalde frequenties trillngen afgeeft die variëren bij verschillende kerntemperaturen. Deze signalen

worden doorgegeven aan de data recorder, zie figuur B2.3, die de proefpersoon gedurende het hele experiment dicht tegen zijn buik moet hebben hangen.



**Figuur B2.3.** V.L.N.R. Buitenkant CorTemp, Binnenkant CorTemp, data logger

## HUIDTEMPERATUUR

De huidtemperatuur wordt gemeten met behulp van een iButton. Dit is een siliconen computer chip die omsloten is door een 16mm hoge houder van roestvrij staal, zie figuur B2.4. Deze houder wordt gebruikt als een elektronisch communicatie interface dat bestaat uit de deksel dat in contact staat met de data en uit een voetstuk dat contact maakt met een oppervlak. Beide delen staan in verbinding met de siliconen computer chip.



**Figuur B2.4.** V.L.N.R. Buitenkant iButton, sensor in iButton

## **BIJLAGE 3**

### VRAGENLIJST





## Deel 1: Persoonlijk comfort

1. Hoe voel je je op dit moment?

Heel Warm Beetje warm Neutraal Beetje koel Koel Koud



2. Vind je dit...?

Comfortabel Licht comfortabel Licht oncomfortabel Oncomfortabel



3. Wat zou je op dit moment liever willen?

Warmer Geen verandering Kouder



4. Hoe vind je de thermische omgeving?

Acceptabel Onacceptabel



5a. Hoe voelen op dit moment lokaal de lichaamsdelen?

1. Heel Warm Beetje warm Neutraal Beetje koel Koel Koud



Heel Warm Beetje warm Neutraal Beetje koel Koel Koud



Heel Warm Beetje warm Neutraal Beetje koel Koel Koud



Heel Warm Beetje warm Neutraal Beetje koel Koel Koud



Heel Warm Beetje warm Neutraal Beetje koel Koel Koud



Sb. Hoe voelen op dit moment lokaal de lichaamsdelen?



6. Heet Warm Beetje warm Neutraal Beetje koel Koel Koud
7. Heet Warm Beetje warm Neutraal Beetje koel Koel Koud
8. Heet Warm Beetje warm Neutraal Beetje koel Koel Koud
9. Heet Warm Beetje warm Neutraal Beetje koel Koel Koud
10. Heet Warm Beetje warm Neutraal Beetje koel Koel Koud

Sc. Hoe voelen op dit moment lokaal de lichaamsdelen?



11. Heet Warm Beetje warm Neutraal Beetje koel Koel Koud
12. Heet Warm Beetje warm Neutraal Beetje koel Koel Koud
13. Heet Warm Beetje warm Neutraal Beetje koel Koel Koud
14. Heet Warm Beetje warm Neutraal Beetje koel Koel Koud
15. Heet Warm Beetje warm Neutraal Beetje koel Koel Koud

6. Voel je enige luchtbeweging?

Nee
  Ja

Zo ja, geef in onderstaande figuur aan waar je dit voelt.



1	<input type="checkbox"/>
2	<input type="checkbox"/>
3	<input type="checkbox"/>
4	<input type="checkbox"/>
5	<input type="checkbox"/>
6	<input type="checkbox"/>
7	<input type="checkbox"/>
8	<input type="checkbox"/>
9	<input type="checkbox"/>
10	<input type="checkbox"/>
11	<input type="checkbox"/>
12	<input type="checkbox"/>
13	<input type="checkbox"/>
14	<input type="checkbox"/>
15	<input type="checkbox"/>

7. Wat zou je op dit moment liever willen?

Meer luchtbeweging
  Geen verandering
  Minder luchtbeweging

8. Hoe ervaar je lokaal de thermisch omgeving?



	Comfortabel	Licht comfortabel	Licht oncomfortabel	Oncomfortabel
1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
8	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
9	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
10	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
11	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
12	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
13	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
14	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
15	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

9. Hoe ervaar je op dit moment het binnenklimaat?

Te vochtig  Te droog

Te donker  Te licht

Te stil  Te luidruchtig

Te muff  Te fris

10. Op dit moment heb ik last van:

- Droge ogen
- Tranende ogen
- Verstopte neus
- Droge/geïrriteerde keel
- Droge lippen
- Benauwheid
- Droge huid
- Geïrriteerde huid
- Hoofdpijn
- Lusteloosheid
- Slaperig

11. Geef aan in welke mate je stress ervaart:

Geen stress  Veel stress

12. Geef aan in welke mate je in staat bent om te werken:

0%  100%

13. Andere symptomen/overige opmerkingen

# **BIJLAGE 4**

## HYPOTHESES



## Hypotheses

1. De algehele thermische sensatie wordt significant beïnvloed door de lokale thermische sensatie
  - a. De lokale thermische sensatie wordt significant beïnvloed door huidtemperaturen
  - b. De lokale thermische sensatie wordt significant beïnvloed door lokale omgevingscondities
2. De algehele thermische sensatie wordt significant beïnvloed door lokale huidtemperaturen
3. De algehele thermische sensatie wordt significant beïnvloed door omgevingscondities
4. De algehele thermische sensatie wordt significant beïnvloed door de kerntemperatuur
5. De algehele thermische sensatie wordt significant beïnvloed door vasomotie
6. De algehele thermische sensatie wordt significant beïnvloed door huidtemperatuurgradiënten
7. Het algehele thermisch comfort wordt significant beïnvloed door het lokale thermisch comfort
  - a. Het lokale thermisch comfort wordt significant beïnvloed door huidtemperaturen
  - b. Het lokale thermisch comfort wordt significant beïnvloed door lokale omgevingscondities
8. Het algehele thermisch comfort wordt significant beïnvloed door omgevingscondities
9. Het algehele thermisch comfort wordt significant beïnvloed door de algehele thermische sensatie
10. Het algehele thermisch comfort wordt significant beïnvloed door de kerntemperatuur
11. Het algehele thermisch comfort wordt significant beïnvloed door vasomotie
12. Het algehele thermisch comfort wordt significant beïnvloed door huidtemperatuurgradiënten
13. De lokale huidtemperatuur wordt significant beïnvloed door lokale omgevingscondities
14. Case A is comfortabeler dan Case B
15. Case A is warmer dan Case B
16. De PMV is een juiste voorspeller van de thermische sensatie bij situaties met gecombineerde niet-uniforme omgevingscondities

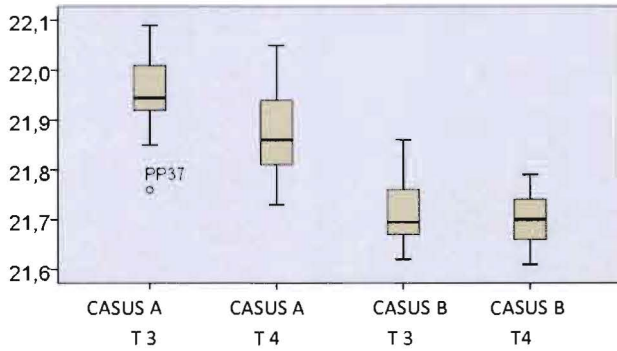




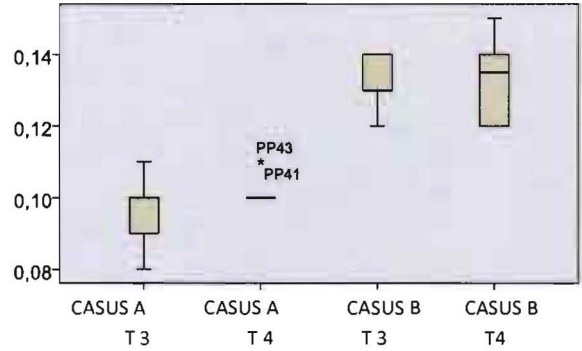
## **BIJLAGE 5**

### OMGEVINGSCONDITIES PROEFPERSONEN ONDERZOEK

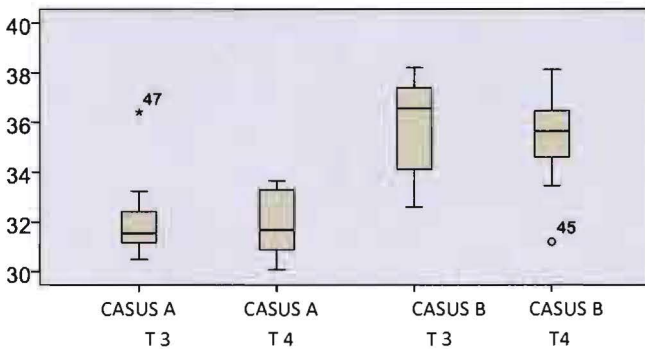




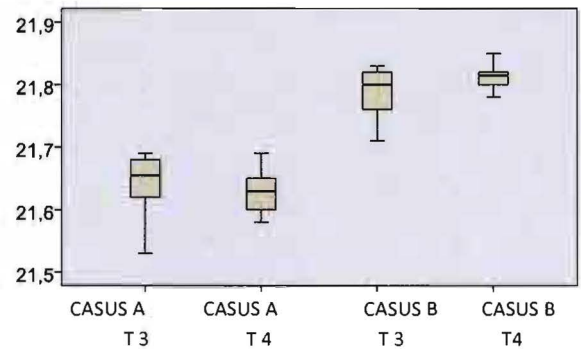
**Figuur B5.1.** Boxplot luchttemperatuur [°C]



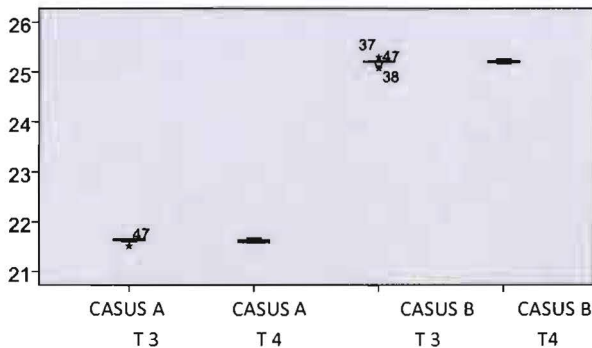
**Figuur B5.2.** Boxplot luchtsnelheid [m/s]



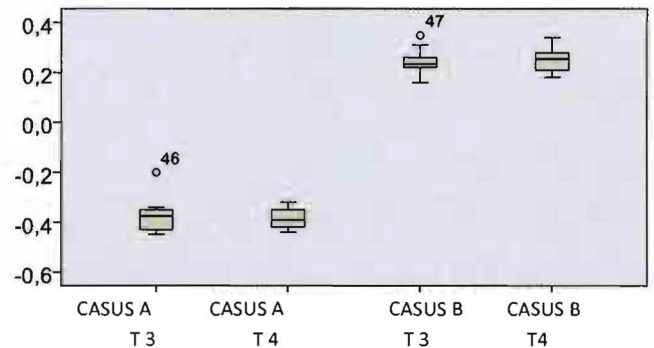
**Figuur B5.3.** Boxplot turbulentie-intensiteit [%]



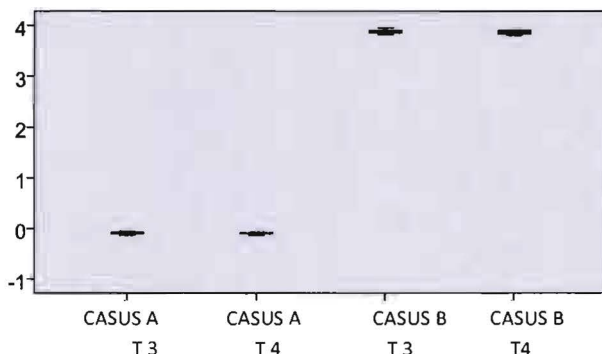
**Figuur B5.4.** Boxplot gemiddelde stralingstemperatuur [°C]



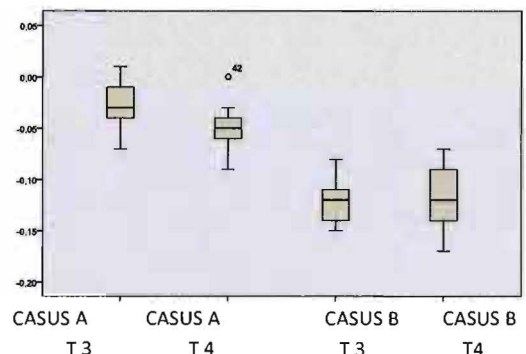
**Figuur B5.5.** Boxplot vloertemperatuur [°C]



**Figuur B5.6.** Boxplot verticale temperatuurgradiënt [°C]



**Figuur B5.7.** Boxplot stralingstemperatuurasyrmetrie [°C]



**Figuur B5.8.** Boxplot verticale temperatuurgradiënt [°C]

**Tabel B5.1.** Significante verschillen tussen Casus A en Casus B

Luchttemperatuur	p<0.005	0.1°C
Turbulentie-intensiteit	p<0.005	-3.506
Luchtsnelheid	p<0.005	-0.031m/s
Gemiddelde stralingstemperatuur	p<0.005	0.17°C
Vloertemperatuur	p<0.005	3.6°C
Verticale temperatuur gradiënt	p<0.005	0.19°C
Stralingstemperatuurasymmetrie	p<0.005	3.9°C

## **BIJLAGE 6**

### **KLEDINGWEERSTAND EN MEETPROTOCOL**



**Tabel B6.1.** Thermische en hygrische eigenschappen van de afzonderlijke kleding stukken en de stoel. In de tabel staan de thermische weerstand ( $I_{cl}$ ), de vergrotingsfactor ten gevolge van kleding ( $f_{cl}$ ), de verdampingsweerstand ( $R_{e,f}$ ) en de vochtpermeabiliteitsindex ( $i_f$ ).

	$I_{cl}$	$f_{cl}$	$R_{e,f}$	$i_f$	
	[clo]	[m <sup>2</sup> K/W]	[-]	[m <sup>2</sup> kPa/W]	[-]
Vest	0.31	0.048	1.06	0.0106	0.584
Joggingbroek	0.34	0.05	1.10	0.0106	0.584
Onderhemd/ T-shirt	0.09	0.014	1.03	0.0052	0.416
Onderbroek	0.04	0.006	1.01	0.0052	0.553
Sokken	0.02	0.003	1.01	0.0076	0.050
Schoenen	0.05	0.008	1.03	0.0790	0.050
Bureaustoel	0.15	-	-	-	-

**Tabel B6.2.** Tijdschema proefpersonenonderzoek

8.00u	Aanvang, doorlezen proefpersoneninformatie en ondertekenen toestemmingsverklaring	13.15u	Start meetsessie C/A en uitdelen lunch
8.15u	Lichte bewegingsoefeningen, meten van antropomorische eigenschappen en aanbrengen van huidtemperatuursensoren	13.30u	T1
8.45u	Uitleg vragenlijsten en procedure	14.00u	T2
9.00u	Start meetsessie A/C en oefenvragenlijst	14.30u	T3
9.30u	T1	15.00u	T4
10.00u	T2	15.15u	Start meetsessie D/B
10.30u	Vragenlijst 3	15.30u	Vragenlijst 1
11.00u	T4	16.00u	Vragenlijst 2
11.15u	Start meetsessie B/D	16.30u	Vragenlijst 3
11.30u	T1	17.00u	Vragenlijst 4
12.00u	T2	17.15u	Einde onderzoek
12.30u	T3		
13.00u	T4		





## **BIJLAGE 7**

### STATISTISCHE ANALYSE PROEFPERSOONONDERZOEK



**Tabel B7.1.** Significantie en correlatie - algehele thermische sensatie verklaard door lokale thermische sensatie

	Co-variant significantie (p)	Correlatie (R <sup>2</sup> )	Correlatie significantie (p)
Thermische sensatie distaal	0.000	0.624	0.001
Thermische sensatie proximaal	0.000	0.415	0.016
Thermische sensatie hoofd	0.000	0.370	0.031
Thermische sensatie voet	0.001	0.446	0.009
Thermische sensatie hand	0.000	0.496	0.004

**Tabel B7.2.** Significantie en correlatie –algehele thermische sensatie verklaard door huidtemperaturen

	Co-variant significantie (p)	Correlatie (R <sup>2</sup> )	Correlatie significantie (p)
Huidtemperatuur distaal	0.030	0.204	0.222
Huidtemperatuur proximaal	0.613	-0.011	0.947
Huidtemperatuur hoofd	0.410	0.139	0.409
Huidtemperatuur hand	0.067	0.188	0.262
Huidtemperatuur voet	0.026	0.215	0.198
Gemiddelde huidtemperatuur	0.853	-0.024	0.887
Verschil huidtemperatuur proximaal en distaal	0.034	-0.215	0.198

**Tabel B7.3.** Significantie en correlatie –algehele thermische sensatie verklaard door kerntemperatuur en vasomotie

	Co-variant significantie (p)	Correlatie (R <sup>2</sup> )	Correlatie significantie (p)
Kerntemperatuur	0.447	-0.070	0.698
Vasomotie	0.059	-0.039	0.817

**Tabel B7.4.** Significantie en correlatie –algehele thermische sensatie verklaard door fysische condities

	Co-variant significantie (p)	Correlatie (R <sup>2</sup> )	Correlatie significantie (p)
Luchttemperatuur	0.557	0.039	0.817
Luchtsnelheid	0.916	-0.043	0.810
Stralingstemperatuur	0.974	-0.057	0.740
Turbulentie-intensiteit	0.113	-0.314	0.060
Vloertemperatuur	0.780	-0.090	0.596
Verticale temperatuurgradiënt	0.825	-0.034	0.843
Stralingstemperatuurasymmetrie	0.751	-0.057	0.740
Tocht*	0.034	-	-

\* combinatie van luchttemperatuur, luchtsnelheid en turbulentie-intensiteit

**Tabel B7.5.** Significantie en correlatie –lokale thermische sensatie verklaard door huidtemperaturen

		Co-variant significantie (p)	Correlatie (R <sup>2</sup> )	Correlatie significantie (p)
Proximale thermische sensatie	Proximale huidtemperatuur	0.483	-0.072	0.669
Distale thermische sensatie	Distale huidtemperaturen	0.298	0.194	0.240
Thermische sensatie hoofd	Huidtemperatuur hoofd	0.306	-0.011	0.948
Thermische sensatie handen	Huidtemperatuur handen	0.132	0.297	0.073
Thermische sensatie voeten	Huidtemperatuur voeten	0.060	0.383	0.020

**Tabel B7.6.** Significantie en correlatie –lokale thermische sensatie verklaard door omgevingscondities

		Co-variaat significantie (p)	Correlatie (R <sup>2</sup> )	Correlatie significantie (p)
Proximale thermische sensatie	Luchttemperatuur	0.920	-0.044	0.792
	Luchtsnelheid	0.640	0.048	0.788
	Stralingstemperatuur	0.517	-0.045	0.792
	Turbulentie-intensiteit	0.738	0.044	0.793
Distale thermische sensatie	Luchttemperatuur	0.106	0.329	0.047
	Luchtsnelheid	0.571	-0.084	0.634
	Stralingstemperatuur	0.926	-0.93	0.577
	Turbulentie-intensiteit	0.049	-0.467	0.005
Thermische sensatie hoofd	Luchttemperatuur	0.639	0.044	0.793
	Luchtsnelheid	0.918	0.006	0.972
	Stralingstemperatuur	0.137	-0.078	0.646
	Turbulentie-intensiteit	0.947	-0.054	0.744
Thermische sensatie handen	Luchttemperatuur	0.041	0.389	0.019
	Luchtsnelheid	0.354	-0.040	0.817
	Stralingstemperatuur	0.505	0.181	0.279
	Turbulentie-intensiteit	0.369	-0.323	0.050
Thermische sensatie voeten	Luchttemperatuur	0.792	0.104	0.534
	Luchtsnelheid	0.377	-0.125	0.480
	Stralingstemperatuur	0.836	0.122	0.470
	Turbulentie-intensiteit	0.597	0.167	0.312

**Tabel B7.7.** Significantie en correlatie –algeheel thermisch comfort verklaard door lokaal thermisch comfort

	Co-variaat significantie (p)	Correlatie (R <sup>2</sup> )	Correlatie significantie (p)
Thermisch comfort proximaal	0.888	-0.49	0.818
Thermisch comfort hoofd	0.260	0.098	0.645
Thermisch comfort linker hand	0.193	-0.247	0.232
Thermisch comfort rechter hand	0.238	-0.295	0.152
Thermisch comfort linker voet	0.872	-0.052	0.802
Thermisch comfort rechter voet	0.784	-0.093	0.650

**Tabel B7.8.** Significantie en correlatie –algeheel thermisch comfort verklaard door huidtemperaturen

	Co-variaat significantie (p)	Correlatie (R <sup>2</sup> )	Correlatie significantie (p)
Huidtemperatuur distaal	0.567	0.115	0.535
Huidtemperatuur proximaal	0.868	-0.086	0.641
Huidtemperatuur hoofd	0.331	0.051	0.786
Huidtemperatuur hand	0.989	0.115	0.535
Huidtemperatuur voet	0.345	0.144	0.438
Gemiddelde huidtemperatuur	0.411	0.150	0.433
Vershil huidtemperatuur proximaal en distaal	0.583	-0.115	0.535

**Tabel B7.9.** Significantie en correlatie –algeheel thermisch comfort verklaard door kerntemperatuur en vasomotie

	Co-variant significantie (p)	Correlatie (R <sup>2</sup> )	Correlatie significantie (p)
Kerntemperatuur	0.662	-0.101	0.587
Vasomotie	0.961	0.035	0.860

**Tabel B7.10.** Significantie en correlatie –algeheel thermisch comfort verklaard door fysische condities

	Co-variant significantie (p)	Correlatie (R <sup>2</sup> )	Correlatie significantie (p)
Luchttemperatuur	0.883	0.007	0.969
Luchtsnelheid	0.620	-0.153	0.443
Stralingstemperatuur	0.057	0.104	0.585
Turbulentie-intensiteit	0.204	-0.115	0.535
Vloertemperatuur	0.461	-0.015	0.938
Verticale temperatuurgradiënt	0.038	0.080	0.669
Stralingstemperatuurasymmetrie	0.140	-0.147	0.436
Tocht*	0.295	-	-

\* combinatie van luchttemperatuur, luchtsnelheid en turbulentie-intensiteit

**Tabel B7.11.** Significantie en correlatie –lokale thermisch comfort verklaard door huidtemperaturen

		Co-variant significantie (p)	Correlatie (R <sup>2</sup> )	Correlatie significantie (p)
Proximaal thermisch comfort	Proximale huidtemperatuur	0.011	-0.129	0.486
Thermisch comfort hoofd	Huidtemperatuur hoofd	0.171	0.129	0.398
Thermisch comfort linker hand	Huidtemperatuur hand	0.210	-0.275	-0.211
Thermisch comfort rechter hand	Huidtemperatuur hand	0.131	0.127	0.242
Thermisch comfort linker voet	Huidtemperatuur voet	0.274	0.107	0.550
Thermisch comfort rechter voet	Huidtemperatuur voet	0.138	0.025	0.890

**Tabel B7.12.** Significantie en correlatie –lokaal thermisch comfort verklaard door omgevingscondities

		Co-variaat significantie (p)	Correlatie (R <sup>2</sup> )	Correlatie significantie (p)
Proximaal thermisch comfort	Luchttemperatuur	0.004	0.022	0.908
	Luchtsnelheid	0.705	-0.309	0.115
	Stralingstemperatuur	0.778	0.292	0.121
	Turbulentie-intensiteit	0.434	-0.122	0.511
Thermisch comfort hoofd	Luchttemperatuur	0.014	-0.153	0.413
	Luchtsnelheid	0.511	-0.246	0.220
	Stralingstemperatuur	0.878	0.130	0.489
	Turbulentie-intensiteit	0.080	0.119	0.518
Thermisch comfort linker hand	Luchttemperatuur	0.046	-0.483	0.008
	Luchtsnelheid	0.700	0.262	0.160
	Stralingstemperatuur	0.487	-0.217	0.237
	Turbulentie-intensiteit	0.229	0.506	0.005
Thermisch comfort rechter hand	Luchttemperatuur	0.030	-0.37	0.042
	Luchtsnelheid	0.969	0.149	0.423
	Stralingstemperatuur	0.935	-0.133	0.468
	Turbulentie-intensiteit	0.230	0.358	0.046
Thermisch comfort linker voet	Luchttemperatuur	0.198	-0.350	0.053
	Luchtsnelheid	0.271	-0.104	0.588
	Stralingstemperatuur	0.342	0.123	0.502
	Turbulentie-intensiteit	0.151	-0.132	0.460
Thermisch comfort rechter voet	Luchttemperatuur	0.181	-0.331	0.066
	Luchtsnelheid	0.335	-0.129	0.499
	Stralingstemperatuur	0.485	0.134	0.464
	Turbulentie-intensiteit	0.128	-0.099	0.580

**Tabel B7.13.** Significantie en correlatie - algeheel thermisch comfort verklaard door lokale thermische sensatie

	Co-variaat significantie (p)	Correlatie (R <sup>2</sup> )	Correlatie significantie (p)
Thermische sensatie distaal	0.441	-0.066	0.726
Thermische sensatie proximaal	0.366	-0.068	0.724
Thermische sensatie hoofd	0.072	-0.356	0.061
Thermische sensatie voet	0.564	-0.088	0.640
Thermische sensatie hand	0.994	0.103	0.585

**Tabel B7.14.** Significantie en correlatie –lokale huidtemperaturen verklaard door fysieke condities

		Co-variaat significantie (p)	Correlatie (R <sup>2</sup> )	Correlatie significantie (p)
Proximale huidtemperatuur	Luchttemperatuur	0.920	-0.044	0.792
	Luchtsnelheid	0.640	0.048	0.788
	Stralingstemperatuur	0.517	-0.045	0.792
	Turbulentie-intensiteit	0.738	0.044	0.793
Distale huidtemperatuur	Luchttemperatuur	0.106	0.329	0.047
	Luchtsnelheid	0.571	-0.084	0.634
	Stralingstemperatuur	0.926	-0.93	0.577
	Turbulentie-intensiteit	0.049	-0.467	0.005
Huidtemperatuur hoofd	Luchttemperatuur	0.639	0.044	0.793
	Luchtsnelheid	0.918	0.006	0.972
	Stralingstemperatuur	0.137	-0.078	0.646
	Turbulentie-intensiteit	0.947	-0.054	0.744
Huidtemperatuur handen	Luchttemperatuur	0.041	0.389	0.019
	Luchtsnelheid	0.354	-0.040	0.817
	Stralingstemperatuur	0.505	0.181	0.279
	Turbulentie-intensiteit	0.369	-0.323	0.050
Huidtemperatuur voeten	Luchttemperatuur	0.792	0.104	0.534
	Luchtsnelheid	0.377	-0.125	0.480
	Stralingstemperatuur	0.836	0.122	0.470
	Turbulentie-intensiteit	0.597	0.167	0.312



2010-2011

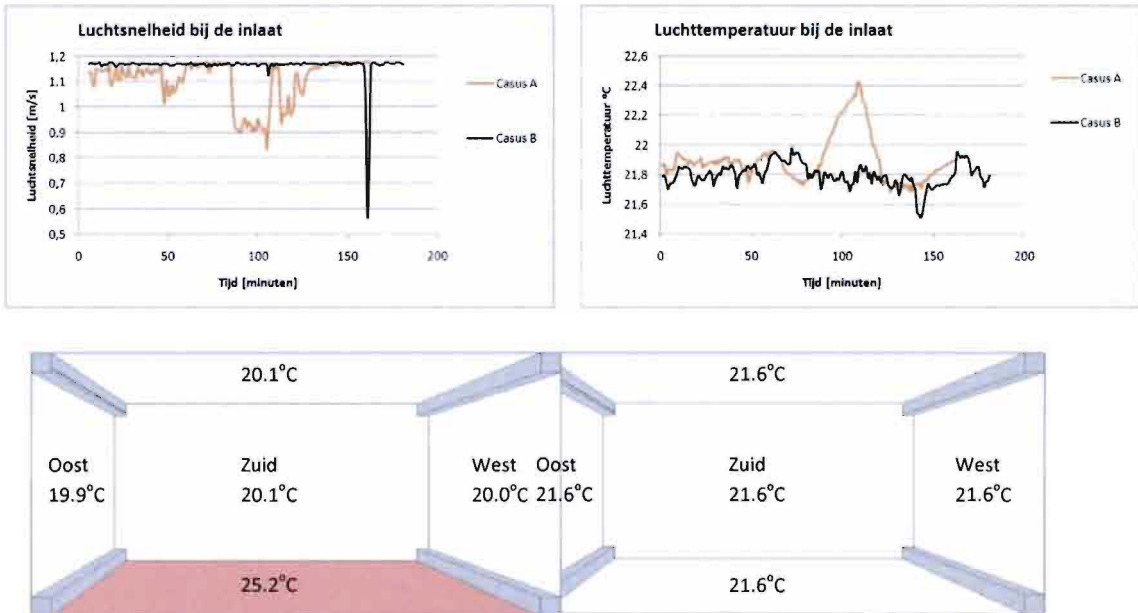
1

2

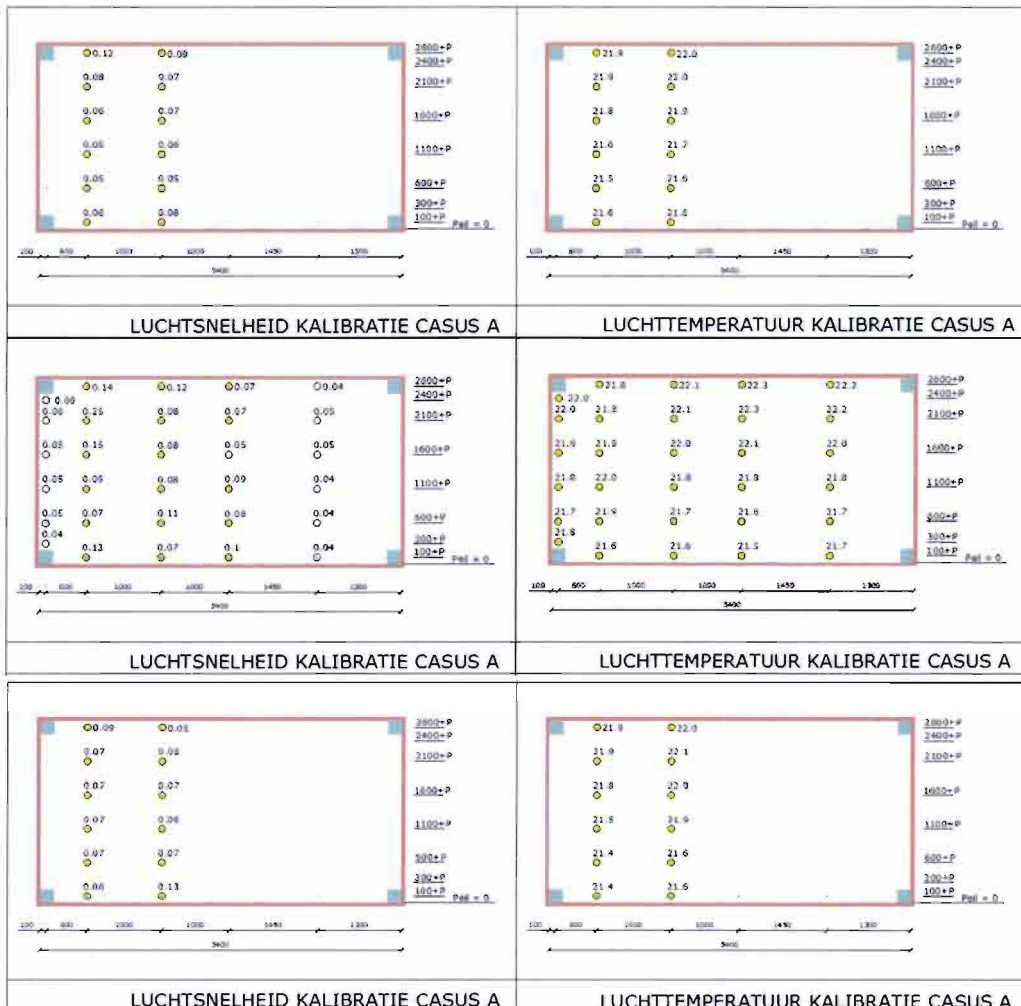
## **BIJLAGE 8**

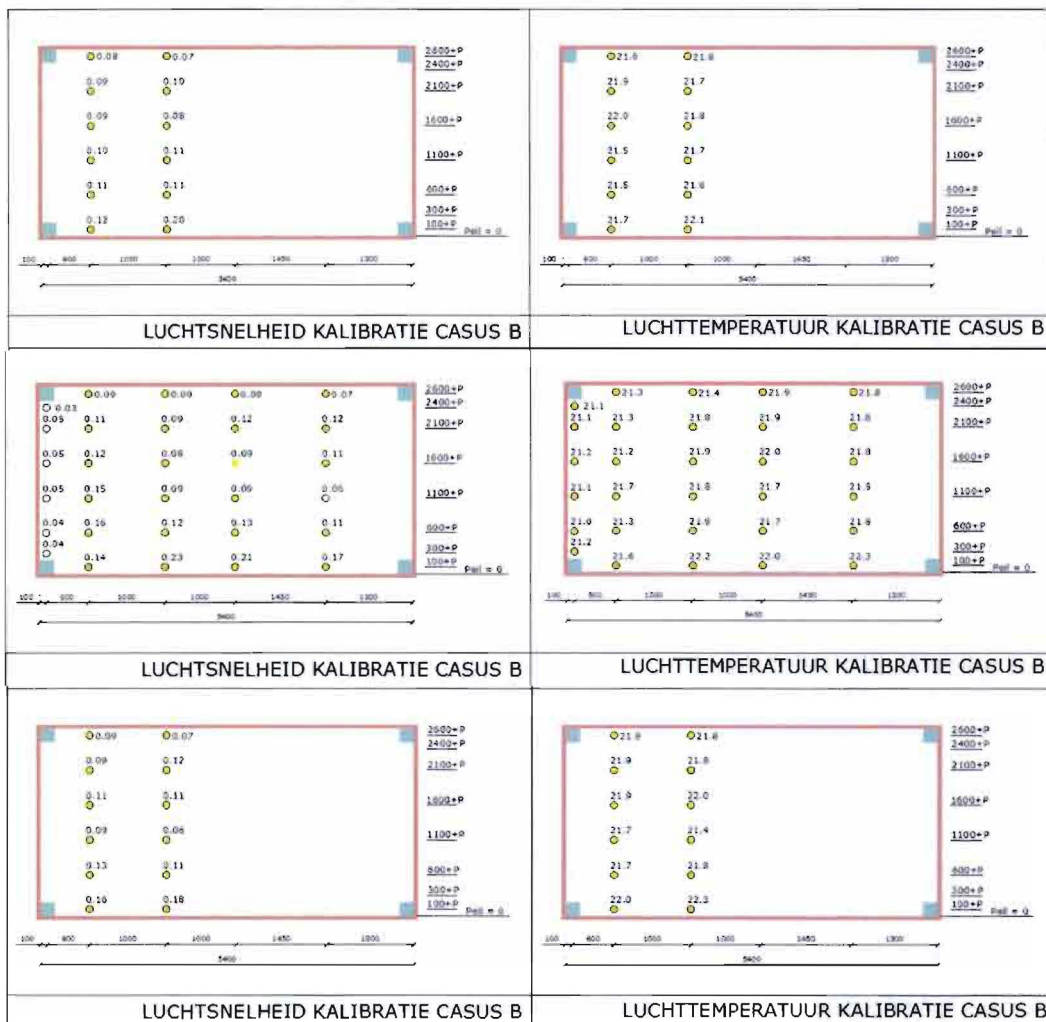
### MEETDATA KALIBRATIE





**Figuur B8.1.** Gemeten oppervlaktetemperaturen. Links: Casus B, met wand noord is 20.4°C Rechts: Casus A met wand noord is 21.7°C.

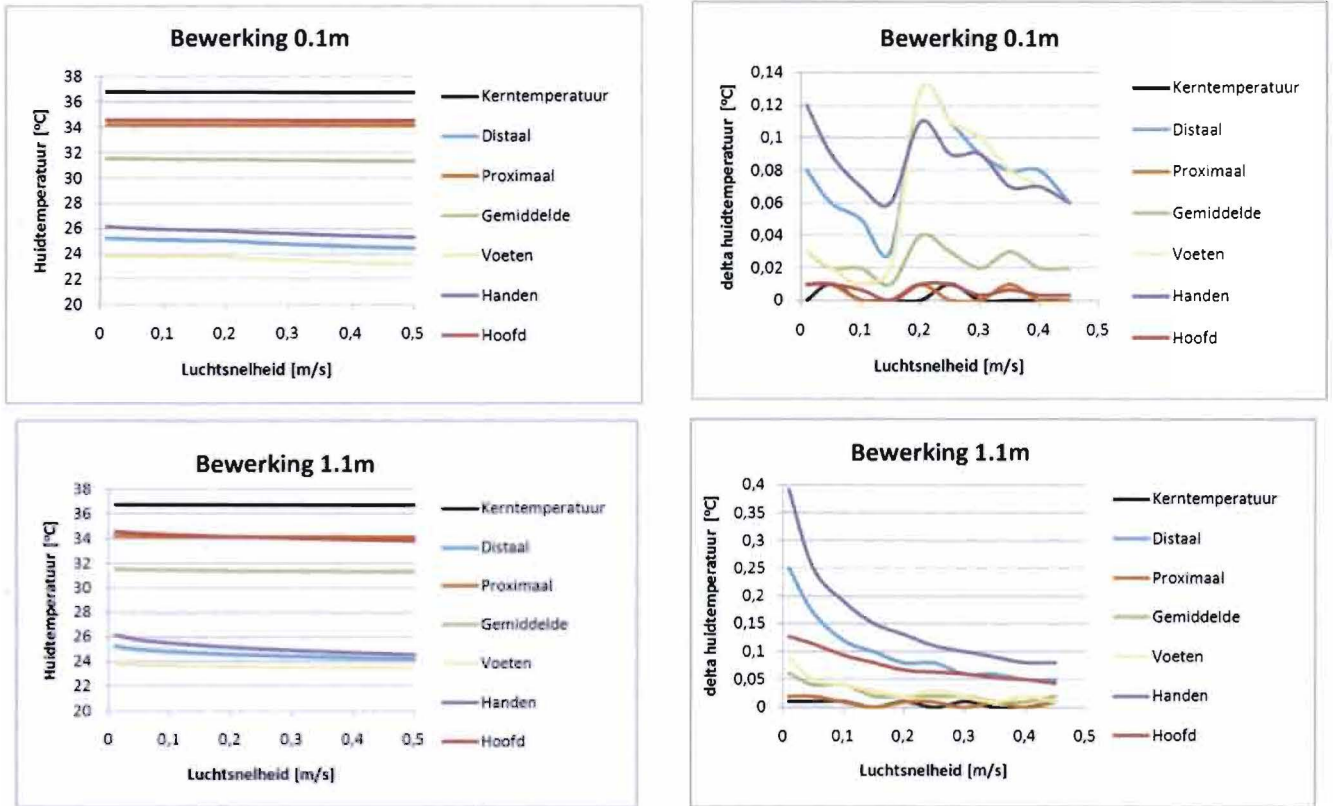




# BIJLAGE 9

## THERMOSEM





Figuur B9.1. Gevoeligheid ThermoSEM Bewerking 0.1m en Bewerking 1.1m

Tabel B9.1. Invoer variantenstudie ThermoSEM op basis van CFD-resultaten. De RV is voor alle posities 40%.

	Tair [C]						Twall [C]						v_air [m/s]					
	1.1m		0.6m		0.1m		Front	Back	Right	Left	Bottom	Ceiling	1.1m		0.6m		0.1m	
	rechts	links	rechts	links	rechts	links							rechts	links	rechts	links	rechts	links
Casus A	20.96	20.94	20.91	20.94	20.89	20.86	21.60	21.60	21.60	21.60	21.60	21.60	0.03	0.06	0.03	0.05	0.11	0.11
Casus B	20.63	20.84	20.60	20.76	20.52	20.71	20.10	20.10	20.10	20.10	25.20	20.10	0.07	0.07	0.08	0.07	0.15	0.17
Casus C	19.81	19.65	19.47	19.46	18.83	18.85	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Casus D	19.77	19.69	19.49	19.61	18.49	18.89	20.70	20.70	20.70	20.70	27.20	20.70	0.04	0.08	0.04	0.04	0.30	0.29
Casus E	19.41	19.33	19.13	19.19	18.10	18.43	21.80	21.80	21.80	21.80	27.20	21.80	0.04	0.06	0.03	0.03	0.29	0.28
Casus F	18.93	18.80	18.50	18.45	16.77	17.22	24.30	24.30	24.30	24.30	25.20	24.30	0.03	0.09	0.04	0.05	0.31	0.33