

MASTER

De invloed van een dynamisch binnenklimaat op thermisch comfort en productiviteit een onderzoek met proefpersonen onder laboratoriumcondities

Schellen, L.

Award date:
2007

[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

DISK



Lisje Schellen

De invloed van een dynamisch binnenklimaat op thermisch comfort en productiviteit

Een onderzoek met proefpersonen onder laboratoriumcondities

De invloed van een dynamisch binnenklimaat op thermisch comfort en productiviteit

Een onderzoek met proefpersonen onder laboratoriumcondities

L. Schellen BSc
0532632

Oktober 2007

Afstudeerproject

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

Afstudeercommissie:

prof.dr.ir. M.H. de Wit, Faculteit Bouwkunde, Technische Universiteit Eindhoven
dr.ir. W.D. van Marken Lichtenbelt, Faculteit Humane Biologie, Universiteit Maastricht
dr.ir. A.W.M. van Schijndel, Faculteit Bouwkunde, Technische Universiteit Eindhoven
dr.ir. A.J.H. Frijns, Faculteit Werktuigbouwkunde, Technische Universiteit Eindhoven

Dit onderzoek werd verricht in het kader van het project Exergetische Systeembenadering – voor een efficiënte, mensvriendelijke en betaalbare inzet van energie in de gebouwde omgeving (SenterNovem projectnummer EOS LT02003).

Voorwoord

Dit onderzoek wordt uitgevoerd in het kader van het afstudeerproject binnen de Mastertrack Physics of the Built Environment. Dit verslag is geschreven ter afronding van het afstudeerproject.

Binnen dit onderzoek bestaat er een samenwerkingsverband tussen de faculteit Bouwkunde en de faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven en de Universiteit van Maastricht. Het initiatief voor dit samenwerkingsverband is voortgekomen uit de behoefte om thermisch comfort, persoonlijk comfort en productiviteit objectief te kunnen beoordelen en om het thermisch comfort te kunnen voorspellen aan de hand van een simulatiemodel. Dit onderzoek werd uitgevoerd op een raakvlak van bouwkunde en gezondheidswetenschappen

Ik wil graag een aantal personen bedanken voor hun begeleiding, medewerking en betrokkenheid bij dit afstudeeronderzoek. Als eerste wil ik graag prof.dr.ir. M.H. De Wit en ir. Van Schijndel van de faculteit Bouwkunde, dr.ir. A.J.H. Frijns van de faculteit Werktuigbouwkunde en dr. W.D. Van Marken Lichtenbelt van de Universiteit Maastricht bedanken voor hun begeleiding bij dit project.

Tevens wil ik graag ing. J.F.L. Diepens, ing. E.H.J. Smits en W.J.M. van Bommel bedanken voor het beschikbaar stellen van de laboratoriumfaciliteiten en het oprichten van de meetruimte. Ing. M.A.P. van Aarle en P.H. Cappon wil ik bedanken voor hun hulp bij het kalibreren van de meetsensoren. Ing. H.L.W. Smulders wil ik bedanken voor zijn hulp bij het maken van de webapplicatie en het beschikbaar stellen van de softwarefaciliteiten. Daarnaast wil ik uiteraard graag alle proefpersonen bedanken die aan het onderzoek hebben deelgenomen, zonder hun was het onderzoek niet mogelijk geweest.

Ten slotte wil ik graag dr.ir. J. Toftum van het International Centre for Indoor Environment and Energy uit Denemarken bedanken voor het beschikbaar stellen van de prestatietesten en zijn gastvriendelijkheid tijdens mijn verblijf in Kopenhagen.

Lisje Schellen

Oktober 2007

Samenvatting

In de laatste jaren werd steeds meer duidelijk dat volledig geklimatiseerde gebouwen, die geregeld worden op een constante binnentemperatuur, niet altijd leiden tot een optimaal thermisch comfort. Verschillende eerder verrichte onderzoeken hebben uitgewezen dat gebruikers in gebouwen met een beperkte klimaatregeling (bijvoorbeeld natuurlijk geventileerde gebouwen) zich vaak comfortabeler voelen dan gebruikers in volledig geklimatiseerde gebouwen. Aan de hand van deze onderzoeken werd geconcludeerd dat gebruikers in gebouwen met een beperkte klimaatregeling een grotere temperatuurrange en meer fluctuaties in de temperatuur gedurende de dag accepteren. Bovendien kan het variabel regelen van de temperatuur een grote energiebesparing opleveren op gebouwniveau, doordat de temperatuur niet meer constant geregeld dient te worden.

Het doel van dit onderzoek was om te onderzoeken binnen welke temperatuurrange temperatuurfluctuaties in geklimatiseerde gebouwen thermisch acceptabel zijn en wat de invloed hiervan is op de fysiologische responses, de productiviteit en prestatie van gebruikers. Daarnaast werd er bekeken of de fysiologische responses en het thermisch comfort, onder fluctuerende omstandigheden, gesimuleerd kunnen worden met behulp van een thermofysiologisch simulatiemodel.

Aan de hand van een laboratoriumonderzoek, met behulp van proefpersonen, is onderzocht in welke mate een variërend temperatuurverloop een invloed heeft op het thermisch comfort, de productiviteit en de prestatie. Voor het beoordelen van de productiviteit en prestatie is gebruik gemaakt van de 'Remote Performance Measurement' (RPM) methode, welke ontwikkeld is door het International Centre for Indoor Environment and Energy van de Technische Universiteit Denemarken.

Op basis van de meetresultaten kan geconcludeerd worden dat de temperatuurveranderingen waarneembaar zijn door de proefpersonen. Er blijkt een significante relatie te bestaan tussen de gemeten gemiddelde huidtemperatuur, de gemiddelde ruimtetemperatuur en de thermische sensatie van de proefpersonen. Het meervoudige regressiemodel dat, aan de hand van de gemiddelde ruimtetemperatuur en de gemiddelde huidtemperatuur, werd opgesteld laat binnen dit onderzoek een duidelijke overeenkomst zien met het PMV model dat door Fanger werd opgesteld. Hieruit blijkt dat de conclusies die in eerdere onderzoeken werden getrokken, dat het PMV model niet bruikbaar is in situaties die dynamisch zijn, niet altijd geldig zijn. Tevens werd geconcludeerd dat het variërend temperatuurverloop niet leidt tot onacceptabele situaties. Aan de hand van de productiviteits- en prestatietesten blijkt dat er binnen dit onderzoek geen significante invloed bestaat van de temperatuur op de productiviteit en prestatie.

De simulaties van de fysiologische responses en de thermische sensatie zijn verricht met behulp van het thermofysiologisch model dat op dit moment nog in ontwikkeling is bij de faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven, in samenwerking met de Universiteit van Maastricht. Binnen dit model zijn zowel de gemeten fysische condities als de lichaamskenmerken van de proefpersonen als randvoorwaarden ingevoerd.

Aan de hand van de resultaten bleek dat de luchtsnelheid niet goed wordt meegenomen in het model. Uit de resultaten van de simulaties met een lage luchtsnelheid blijkt dat de gesimuleerde gemiddelde huidtemperaturen redelijk goed overeenkomen met de gemeten gemiddelde huidtemperatuur (de gemiddelde afwijking in de huidtemperatuur bedraagt $1,14^{\circ}\text{C}$). Hieruit kan afgeleid worden dat het variërende temperatuurverloop goed meegenomen wordt in het model. De gesimuleerde kerntemperaturen bij een constant temperatuurverloop laten ook een goede overeenkomst zien met de gemeten kerntemperatuur (gemiddelde afwijking bedraagt $-0,10^{\circ}\text{C}$). De gesimuleerde kerntemperatuur bij het variërende temperatuurverloop laat een afwijking zien ten opzichte van de gemeten kerntemperatuur (gemiddelde afwijking bedraagt $0,48^{\circ}\text{C}$).

De thermische sensatie (weergegeven op de 7-punts comfortschaal) wordt in het model voorspeld aan de hand van de gemiddelde huidtemperatuur, de kerntemperatuur en de snelheid waarmee de gemiddelde huidtemperatuur verandert. Uit een vergelijking met de meetresultaten is gebleken dat de thermische sensatie gedurende een constant temperatuurverloop goed voorspeld kan worden. (de gemiddelde afwijking bedraagt $0,20$). Wanneer de omgevingstemperatuur varieert kan de thermische sensatie nog steeds redelijk voorspeld worden (gemiddelde afwijking bedraagt $0,39$).

Aan de hand van deze resultaten blijkt dat het simulatiemodel zeer hoopgevend is voor de toekomst.

Summary

In the last years there is more evidence that air-conditioned buildings, with a constant indoor climate, not always lead to optimal thermal comfort. Recent studies have showed that occupants in naturally ventilated, free running buildings are more often satisfied with their thermal environment and accept a wider temperature range than occupants in air-conditioned buildings. In comparison with a constant temperature, allowing temperatures to drift could also be helpful to reduce the energy use in buildings.

The objective of this research was to examine in which temperature range temperature fluctuations are acceptable in air-conditioned buildings and to study the effects of a moderate temperature drift on human thermal comfort, physiological responses, productivity and performance. Furthermore, a thermophysiological model, based on the model of Fiala, was used to examine the possibility of simulating human thermal responses and thermal comfort under moderate transient conditions.

To examine the influence of a moderate temperature ramp a climate room set-up with experimental subjects was used. To assess the productivity and performance the 'Remote Performance Measurement' (RPM) method, developed by the International Centre for Indoor Environment of the Danish Technical University, was used.

The measurement results showed that the temperature changes were noticeable to the subjects. A significant relation was found between the measured mean skin temperature, the mean room temperature and the thermal sensation of the subjects. The multiple regression model that was formed, on the basis of the room temperature and the average skin temperature, showed a good agreement with the PMV model of Fanger. From this it can be concluded that the statement that the PMV model is not usable in transient conditions is not always valid. Furthermore it can be concluded that these studied moderate temperature drifts not lead to unacceptable situations. In this study the results of the performance and productivity tests revealed that there is no influence of the temperature on the productivity and performance.

The simulations of the physiological responses and thermal sensation are performed with a thermophysiological model that was developed at the department of Mechanical Engineering at Eindhoven University of Technology, in cooperation with Maastricht University. Both the measured physical conditions and the body characteristics of the subjects were entered as boundary conditions.

The first simulation results showed that the air flow plays an important role in the prediction of the mean skin temperature. Due to the relatively high measured mean air velocity a large

deviation occurs between the measured mean skin temperature and the predicted mean skin temperature. An inaccurate prediction of the air velocity in the boundary layer of air between the skin and the clothing probably caused this deviation. The simulation results of the mean skin temperatures that were obtained with the lower mean air velocity were in good agreement with the measured mean skin temperatures (the mean deviation in mean skin temperature was 1.14°C). From these results it can be concluded that the varying temperatures are taken in to account in a right way. The simulated core temperatures, in the experiments with a constant room temperature, showed a good agreement with the measured core temperatures too (the mean deviation was -0.10°C). The simulated core temperatures, in the experiments with varying room temperatures, showed a relatively large deviation between the measured and predicted core temperatures (mean deviation was 0.48°C).

In the model the thermal sensation (represented on a 7-point scale) is predicted from the mean skin temperature, the core temperature and the rate of change of mean skin temperature. According to the results it can be concluded that the prediction of the thermal sensation, during the experiments with a constant room temperature, was in good agreement with the measured thermal sensation (the mean deviation was 0.20). In case of varying room temperatures, the thermal sensation still can be predicted very well (mean deviation was 0.39).

The results from this study showed that the simulation model is very promising for the future.

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	I
Samenvatting	III
Summary	V

Deel A. Introductie

1. Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Relevantie	2
1.3 Probleemstelling	2
1.4 Doelstelling	2
1.5 Onderzoeksvragen.....	3
1.6 Methode van aanpak	4

Deel B. Literatuuronderzoek

2. Thermisch comfort	5
2.1 Algemeen	5
2.2 Comfortmodel Fanger	6
2.3 Lokaal discomfort	10
3. Thermoregulatie van de mens.....	13
3.1 Algemeen	13
3.1 Fysische processen	13
3.2 Thermoregulatie	15
4. Thermofysiologische modellen.....	21
4.1 Het Stolwijk model	21
4.2 Het Berkeley model.....	23
4.3 Het Fiala model.....	25
4.4 Het WBTfun model.....	29
5. Adaptieve modellen.....	31
5.1 Thermische adaptatie	31
5.2 Modellen.....	32
5.3 Huidige comfortnormen.....	38
5.4 Conclusie	38
6. Productiviteit en prestatie	39
6.1 Binnenklimaat versus productiviteit en prestatie.....	39
6.2 SBS symptomen	42
6.3 Beoordelingsmethoden	43

Deel C. Experiment

7. Methoden	45
7.1 Doelstelling	45
7.2 Onderzoekruimte	45
7.3 Proefpersonen	52
7.4 Vragenlijsten	56
7.5 Statistische methoden	61
7.6 Meetprotocol	64
8. Meetresultaten	65
8.1 Omgevingsparameters	65
8.2 Fysiologische parameters	68
8.3 Resultaten comfortvragenlijsten	75
8.4 Resultaten productiviteitstaken	82

Deel D. Simulaties

9. Resultaten thermofysiologisch model	89
9.1 Randvoorwaarden	89
9.1.1 Lichaamskenmerken proefpersonen	89
9.2 Vergelijking simulatieresultaten en meetresultaten	91
9.3 Gevoeligheidsanalyse	98

Deel E. Conclusies

10. Conclusies en discussie	103
10.1 Invloed van variërend temperatuurverloop op fysiologische responses en thermisch comfort	103
10.2 Invloed van variërend temperatuurverloop op prestatie en productiviteit	104
10.3 Voorspelling thermische sensatie met behulp van een thermofysiologisch model	105
11. Aanbevelingen	109
11.1 Vervolgonderzoek	109
11.2 Thermofysiologisch model	110
Literatuurlijst	111
Nomenclatuur	121

Appendices

Deel A

Introductie

1. Inleiding

In de laatste jaren wordt er veel aandacht besteed aan het comfort van personen in gebouwen, vooral nu steeds meer blijkt dat volledig geklimatiseerde gebouwen niet altijd leiden tot een optimaal comfort. Verschillende studies hebben uitgewezen dat gebruikers in gebouwen zonder een klimaatregeling (onder andere natuurlijk geventileerde gebouwen) zich over het algemeen comfortabeler voelen dan gebruikers in volledig geklimatiseerde gebouwen [Jaakkola, 2001; De Dear en Brager, 2001; Olesen en Parsons, 2002; Kurvers et al., 2002; Olesen, 2004; Ye et al., 2006,]. In gebouwen zonder een klimaatregeling accepteren gebruikers een grotere temperatuurrange en meer fluctuaties in de temperatuur gedurende de dag. Het toestaan van meer fluctuaties en een bredere temperatuurrange zorgt er voor dat de temperatuur niet op een constant niveau geregeld hoeft te worden. Een constante regeling leidt tot een, vaak onnodig, hoog energiegebruik in kantoorgebouwen. In een eerder verricht onderzoek van De Dear (1998) wordt verondersteld dat het dynamisch regelen van een klimaatsysteem kan leiden tot het verbeteren van het thermisch comfort en tot een grotere energiebesparing. De uitdaging is om te bekijken binnen welke temperatuurrange, en in welke mate, het binnenklimaat mag variëren in gebouwen waarbij de gebruiker weinig of geen individuele controle mogelijkheden hebben. Dit onderzoek zal zich erop richten om de invloed van een dynamische klimaatregeling te bepalen. Naast het beoordelen van het thermisch comfort en de invloed op de fysiologische responses zal tevens de prestatie en productiviteit van de gebruikers beoordeeld worden.

1.1 Aanleiding

De directe aanleiding voor dit onderzoek komt voort uit de behoefte om de invloed van een grotere temperatuurrange in geklimatiseerde gebouwen te onderzoeken. Onder andere Berglund en Gonzalez 1978a, De Dear 1998, Olesen en Parsons 2002 en Nagano et al. 2005 spreken deze behoefte uit in hun aanbevelingen. Een andere aanleiding voor dit onderzoek is het vanuit SenterNovem opgestarte 'Nieuw Energie Onderzoek' [SenterNovem, 2007]. Binnen dit onderzoek stelt SenterNovem middelen ter beschikking voor innovatieve onderzoeken die verduurzaming van de energiehuishouding als doel hebben. Deze middelen worden ter beschikking gesteld vanuit het internationale vraagstuk om duurzaam energiegebruik te stimuleren en de uitstoot van broeikasgassen te reduceren.

1.2 Relevantie

Tegenwoordig wordt er veel onderzoek gedaan naar het reduceren van het energieverbruik in relatie tot het verbeteren van het thermisch comfort. Het verbeteren van het algemeen welbevinden, en met name het thermisch comfort, leidt er tevens toe dat klachten verminderen. Het verminderen en wegnemen van klachten bij gebruikers kan er voor zorgen dat het ziekteverzuim teruggebracht wordt naar een minimum. Het terugbrengen hiervan levert een jaarlijkse besparing aan loonkosten op. Tevens kan dit leiden tot een hogere productiviteit [Sundell, 1993; Fang, 2004; Kurvers, 2002]. Vanuit het oogpunt van energieduurzaamheid kan dit project bijdragen aan een installatieconcept dat energiebesparend is ten opzichte van de huidige systemen en wat tegelijkertijd de productiviteit en prestatie niet negatief beïnvloedt.

1.3 Probleemstelling

Ongeveer eenderde van het totale wereldwijde energieverbruik wordt gebruikt voor het verwarmen, koelen en ventileren van gebouwen [IEA ECBCS, 2007]. Om dit energieverbruik te reduceren wordt er de laatste jaren steeds meer aandacht aan besteedt en onderzoek naar verricht. Eerder werd al genoemd dat er verondersteld wordt dat het toestaan van grotere temperatuurfluctuaties gedurende de dag kan leiden tot energiebesparingen. Uit eerder verrichte onderzoeken van Berglund en Gonzalez (1978a) en Griffiths en McIntyre (1974) bleek dat een stijging van de temperatuur met 0,5°C per uur niet significant waarneembaar was voor gebruikers. Tevens bleek uit het onderzoek van Berglund en Gonzalez dat de toelaatbare afwijking van de comforttemperatuur groter was bij snellere temperatuurveranderingen (1,0°C/h en 1,5°C/h) dan bij langzame temperatuurveranderingen (0,5°C/h). Echter, de vraag binnen welke temperatuurrange deze veranderingen nog acceptabel zijn is nog niet beantwoord.

1.4 Doelstelling

Het voornaamste doel van dit onderzoek is om te onderzoeken binnen welke temperatuurrange temperatuurfluctuaties thermisch acceptabel zijn en wat de invloed is van deze fluctuaties op de productiviteit en prestatie van gebruikers. Daarnaast zal er gekeken worden of de invloed van een fluctuerende temperatuur op het thermisch comfort van de gebruikers gesimuleerd kan worden met behulp van een thermofysiologisch simulatiemodel. Hierbij wordt er eerst bekeken of het mogelijk is om de fysiologische respons van het lichaam te simuleren met behulp van een dergelijk model. Indien dit mogelijk blijkt te zijn, wordt er

bekeken of er ook een relatie gelegd kan worden tussen de fysiologische parameters en de thermische sensatie.

1.5 Onderzoeksvragen

Om de doelstellingen van dit onderzoek te kunnen realiseren zijn er voorafgaand aan het onderzoek verschillende onderzoeksvragen geformuleerd.

De onderzoeksvragen zijn naar verschillende niveau's, van grof naar fijn, indeelbaar. Binnen het onderzoek zijn er een aantal hoofdonderzoeksvragen te onderscheiden. Deze hoofdvragen kunnen vervolgens onderverdeeld worden in verscheidene subonderzoeksvragen.

1. Wat is de invloed van een variërend temperatuurverloop op de fysiologische parameters en het thermisch comfort?
 - 1.1 Zijn de veranderingen waarneembaar voor de proefpersonen?
 - 1.2 Is het mogelijk om een relatie te leggen tussen de fysiologische parameters en het thermisch comfort?
 - 1.3 Is het variërend temperatuurverloop thermisch acceptabel?
2. Bestaat er een invloed van de binnentemperatuur op de productiviteit en prestatie van gebruikers?
 - 2.1 Welke factoren zijn eventueel van invloed op de prestatie en productiviteit van personen?
 - 2.2 Hoe groot is de eventuele invloed van de temperatuur?
3. Is het mogelijk om met behulp van een thermofysiologisch model het thermisch comfort van personen te voorspellen bij fluctuerende temperaturen?
 - 3.1 Kan de fysiologische respons (huid- en kerntemperatuur) van een individuele persoon bij fluctuerende binnentemperaturen goed voorspeld worden?
 - 3.2 Is het mogelijk om aan de hand van de, met behulp van het thermofysiologisch model, gesimuleerde huidtemperaturen en kerntemperatuur de thermische sensatie te voorspellen?

1.6 Methode van aanpak

Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden zijn er verschillende activiteiten verricht. Deze worden in het navolgende kort toegelicht.

- Literatuurstudie

Er is een uitgebreide literatuurstudie verricht naar thermisch comfort, de werking van het thermoregulatiesysteem van het menselijk lichaam en modellen ter voorspelling van het thermisch comfort.

Tevens is er een literatuurstudie verricht naar adaptieve modellen en dynamische klimaatregelingen. Daarnaast is er ook gezocht naar factoren die een invloed hebben op de prestatie en productiviteit van de mens en in het verleden verrichte vergelijkbare onderzoeken. Bij de studie naar vergelijkbare onderzoeken is er vooral gezocht naar methoden waarmee de productiviteit en prestatie van personen objectief beoordeeld kunnen worden. Ook is er hierbij gekeken naar onderzoeken waarvan de doelstellingen vergelijkbaar zijn met de in dit onderzoek beoogde doelstellingen.

- Metingen met behulp van proefpersonen onder laboratoriumomstandigheden

Om te bepalen of er een invloed is van fluctuaties in de binnentemperatuur op het thermisch comfort, de productiviteit en de prestatie van personen zijn er metingen onder gecontroleerde laboratoriumcondities verricht met proefpersonen. Aan de hand van deze metingen kan er beoordeeld worden of er sprake is van een invloed. Eveneens kunnen aan de hand van deze metingen de simulaties die verricht zijn gevalideerd worden. Voor het beoordelen van het thermisch comfort, de productiviteit en de prestatie van de proefpersonen is er gebruik gemaakt van vragenlijsten en prestatietesten die ontwikkeld zijn door het International Centre for Indoor Environment and Energy uit Denemarken.

- Simulaties met behulp van een thermofysiologisch model

Voor het simuleren van de fysiologische respons en de thermische sensatie is er gebruik gemaakt van het thermofysiologisch model dat op dit moment nog in ontwikkeling is bij de faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven. De gesimuleerde fysiologische respons en het thermisch comfort zijn vergeleken met de meetresultaten. Er is gekeken naar zowel de resultaten die verkregen worden bij de invoer van een gestandaardiseerd persoon als naar de resultaten die verkregen worden bij de invoer van de individuele lichaamskarakteristieken van de proefpersonen.

Deel B

Literatuuronderzoek

2. Thermisch comfort

Thermisch comfort kan op verschillende manieren gedefinieerd worden. In de ASHRAE standaard 55 (2004) wordt thermisch comfort gedefinieerd als 'de gevoelsstaat die tevredenheid met de thermische omgeving representeert'. De reden waarom een persoon aangeeft dat een bepaalde omgeving thermisch comfortabel is, of juist niet, is complex en tot op heden niet bekend. Wel is bekend dat het ontbreken van een thermisch comfortabele omgeving een negatieve invloed heeft op de gezondheid en de productiviteit. Vanwege deze invloed is er in het verleden veel onderzoek verricht naar de parameters en condities die thermisch comfort bewerkstelligen.

2.1 Algemeen

Omdat er grote verschillen zijn tussen personen, zowel fysiologisch als psychologisch, is het moeilijk om iedereen in één ruimte tevreden te stellen. De omgevingscondities die benodigd zijn voor comfort zijn niet gelijk voor iedereen. In het verleden is er door vele onderzoekers uitgebreid laboratorium- en praktijkonderzoek verricht naar de parameters die een invloed hebben op het thermisch comfort. Daarnaast is er ook veel onderzoek gedaan naar het opstellen van een model dat het comfort van gebruikers van een ruimte of gebouw kan voorspellen. Met behulp van de resultaten van deze onderzoeken is het mogelijk om condities te definiëren die thermisch comfortabel of acceptabel zijn voor een groot gedeelte van de gebruikers. Een van deze onderzoeken is verricht door ASHVE in 1925, dit onderzoek resulteerde in een index voor de effectieve temperatuur (ET) [Parsons, 2003]. De ET is de operationele temperatuur van een standaardomgeving bij een relatieve vochtigheid van 50% die dezelfde, voelbare plus latente, warmte-uitwisseling met een persoon zou veroorzaken als in de werkelijke omgeving. Of korter: de ET is de temperatuur van een standaardomgeving, die dezelfde sensatie bewerkstelligt als de werkelijke omgeving. In een ander onderzoek, verricht door Vernon en Warner (1932), werd de gecorrigeerde effectieve temperatuur (CET, nu vaak genoemd als operationele temperatuur) ontwikkeld. Het doel van dit onderzoek was om het effect van straling mee te nemen in de eerder genoemde ET. Beide methoden worden wereldwijd gebruikt als een index voor het comfort. Het bekendste en waarschijnlijk het meest gerefereerde onderzoek werd verricht in de jaren '70 door Fanger. Hij ontwikkelde een model waarmee het comfort voorspeld kan worden voor een grote groep mensen. Dit model werd gebaseerd op regressievergelijkingen die opgesteld werden aan de hand van subjectieve responses van proefpersonen. In paragraaf 2.2 zal hier verder op ingegaan worden. Binnen dit onderzoek werd een schaal ontwikkeld waarop de subjectieve responses van personen over hun thermische sensatie kan worden uitgedrukt. Deze comfortschaal beschikt over een range die loopt van -3 tot +3, hetgeen overeenkomt met respectievelijk koud en heet. Deze schaal is in 1984 genormeerd in de ISO norm 7730 als de zeven-punts comfortschaal, en

wordt in de huidige situatie breed geaccepteerd en gebruikt. In tabel 1 is deze index samen met de corresponderende comforttermen weergegeven [ISO 7730, 1984; ISO 7730, 1994; ISO 7730, 2005; Fanger, 1970; Parsons, 2003; ASHRAE, 2005; Clements-Croome, 2005].

Tabel 2.1: Zeven-punts comfortschaal (ISO 7730, 2005)

Thermische sensatie	Betekenis
+3	Heet
+2	Warm
+1	Beetje warm
0	Neutraal
-1	Beetje koel
-2	Koel
-3	Koud

Een andere manier om thermisch comfort te voorspellen is met behulp van thermofysiologische modellen. Dergelijke modellen zijn gebaseerd op regressievergelijkingen die opgesteld werden aan de hand van objectieve fysiologische metingen. Met behulp van een dergelijk model wordt getracht het thermisch comfort van een persoon te voorspellen aan de hand van de gemodelleerde gemiddelde huid- en kerntemperatuur. Een dergelijk model werd in 1977 voor het eerst ontwikkeld door Stolwijk en Hardy. In hoofdstuk 4 zal nader ingegaan worden op de ontwikkeling en de huidige staat van thermofysiologische modellen.

2.2 Comfortmodel Fanger

In de jaren '70 ontwikkelde Fanger een model waarmee het thermisch comfort van een grote groep gebruikers voorspeld kan worden. Hierbij werd uitgegaan van het idee dat als een persoon zich bevond in een thermisch neutrale situatie, dat dit ook de meest comfortabele situatie was. Een thermische neutrale situatie werd hierbij gedefinieerd als de conditie waarin een persoon zowel geen warmere als geen koudere situatie prefereert. Fanger definieerde aan de hand hiervan vier condities die gelden voor een persoon die in een thermisch comfortabele staat is. Deze condities zijn:

1. De warmtebalans van het lichaam is in evenwicht
2. De zweetproductie ligt binnen de comfortlimieten
3. De gemiddelde huidtemperatuur ligt binnen de comfortlimieten
4. Er is geen lokaal discomfort aanwezig

Vervolgens stelde hij de belangrijkste parameters vast die een invloed hebben op het thermisch comfort. Dit resulteerde in de volgende zes basisparameters: het activiteitsniveau (de warmteproductie in het lichaam), de thermische isolatie van kleding (clo-waarde), de luchttemperatuur, de gemiddelde stralingstemperatuur, de relatieve luchtsnelheid en de

waterdampdruk in lucht. Een thermisch comfortabele situatie kan bereikt worden door veel verschillende combinaties van deze variabelen.

Het doel van het model was om een comfortvergelijking op te stellen, die gebaseerd op de bovenstaande randvoorwaarden de condities kon berekenen voor thermisch comfort, waarbij als input alleen de zes basisparameters benodigd waren. Er wordt aangenomen dat bij een bepaald gegeven activiteitsniveau, als het lichaam niet ver afwijkt van de thermische neutrale situatie, de gemiddelde huidtemperatuur en de zweetproductie de enige fysiologische parameters zijn die een invloed hebben op de warmtebalans. Aan de hand van warmtetransportvergelijkingen, en experimenteel onderzoek werd de comfortvergelijking opgesteld. In de volgende paragraaf wordt er nader op deze vergelijking ingegaan.

2.2.1 Comfortvergelijking

Zoals in de vorige paragraaf werd aangegeven is één van de belangrijkste voorwaarden voor het bereiken van thermisch comfort onder statische condities, het in evenwicht¹ zijn van de warmtebalans. Deze voorwaarde komt direct voort uit het doel van het thermoregulatorische systeem van de mens. In het volgende hoofdstuk zal dit systeem nader behandeld worden. Voor een persoon met een gegeven activiteitsniveau, kleding en omgeving zal een bepaalde combinatie van de huidtemperatuur en hoeveelheid zweet op een dusdanige wijze stijgen zodat de warmtebalans in evenwicht wordt gebracht.

De warmtebalans die Fanger definieerde is weergegeven in vergelijking 1.

$$H - E_d - E_{sw} - E_{re} - L = K = R + C \quad (2.1)$$

Waarin geldt (alle grootheden zijn in W/m²):

- H= Interne warmteproductie in het lichaam
 - E_d= Warmteverlies door waterdampdiffusie door de huid
 - E_{sw}= Warmteverlies door verdamping van zweet aan het huidoppervlak
 - E_{re}= Latent warmteverlies door ademhaling
 - L= Voelbaar warmteverlies door ademhaling
 - K= Warmtetransport van de huid naar de buitenzijde van het geklede lichaam (geleiding door de kleding)
 - R= Warmtetransport door straling
 - C= Warmtetransport door convectie
-

¹ In principe is het geen evenwicht maar een steady state situatie, omdat er in werkelijkheid ook nog een warmteopslagterm aanwezig is.

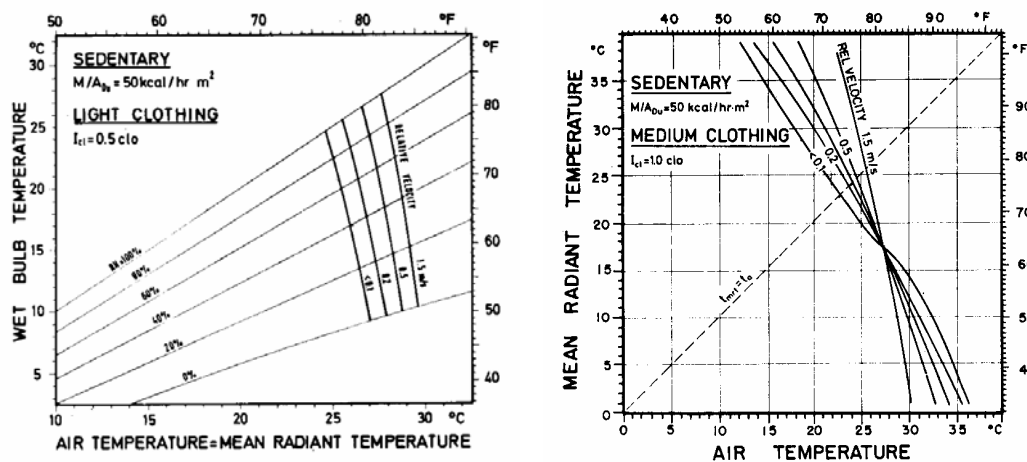
Deze vergelijking representeert dat de interne warmteproductie (H) min het warmteverlies door verdamping aan het huidoppervlak ($E_d + E_{sw}$) en ademhaling ($E_{re} + L$) gelijk is aan het warmteverlies door geleiding van het huidoppervlak naar de buitenzijde van het beklede lichaam ($R+C$). Er wordt tevens aangenomen dat de verdamping aan het oppervlak, overeenkomend met E_{sw} en E_d , plaats vindt aan (of onder) het huidoppervlak.

Echter de warmtebalans alleen is niet voldoende voor het bewerkstelligen van thermisch comfort. Ook al is de warmtebalans van het lichaam in evenwicht, dan nog kan het lichaam oncomfortabel warm zijn door hoge en lage huidtemperaturen (t_{sk}) als gevolg van respectievelijk zweten of vasoconstrictie (vaatvernauwing). De huidtemperaturen ($t_{sk;req}$) en zweethoeveelheden ($E_{sw;req}$) die benodigd zijn voor het bereiken van thermisch comfort zijn afhankelijk van het activiteitsniveau. Eveneens geldt dat binnen de brede grenzen van de omgevingsvariabelen waarin de warmtebalans in evenwicht is er slechts een klein gebied is waarin thermisch comfort bewerkstelligd wordt. Verschillende onderzoeken hebben uitgewezen dat de thermische sensatie (beleving) gerelateerd is aan de gemiddelde huidtemperatuur [Gagge, 1967.; Hardy, 1970]. Tevens werd door onder andere Benzinger (1963) verondersteld dat ook de kerntemperatuur een invloed heeft op de thermische sensatie.

Door het substitueren van de benodigde zweethoeveelheid en de huidtemperatuur term in de warmtebalans vergelijking, en het combineren van de zes parameters definieerde Fanger de comfortvergelijking. De vergelijking is gebaseerd op experimenten die verricht werden met Amerikaanse studenten. Deze studenten werden gedurende een periode van drie uur blootgesteld aan uniforme omgevingen. Om de invloed van geografische aspecten te onderzoeken werd het experiment ook uitgevoerd met 128 Deense studenten. Ook de invloed van leeftijd werd onderzocht door het zelfde experiment nogmaals te verrichten met 128 oudere personen. Doordat de helft van de proefpersonen vrouwelijk was, was het eveneens mogelijk om een uitspraak te doen over de invloed van het geslacht. Uit deze onderzoeken bleek dat er geen significante verschillen optraden tussen de verschillende groepen proefpersonen. Er werd dan ook geconcludeerd dat de comfortvergelijking voor deze groepen personen voldoende valide was [Fanger, 1970]. De comfortvergelijking is weergegeven in Appendix 1.

De comfortvergelijking is een redelijk complexe vergelijking, en voor het oplossen en berekenen van de variabelen is een computerberekening benodigd. Het is daarom ook niet gebruikelijk om deze vergelijking in de praktijk te gebruiken. Voor het gebruik in de praktijk stelde Fanger de zogenaamde comfortdiagrammen op. Enkele van deze diagrammen zijn weergegeven in figuur 2.1. De lijnen in de diagrammen representeren comfortlijnen. De punten op deze lijn komen overeen met de condities die benodigd zijn voor het verkrijgen van thermisch comfort. Tevens stelde Fanger een model op waarmee voorspeld kan worden wat de gemiddelde thermische sensatie (predicted mean vote, PMV) en het percentage

gebruikers dat ontevreden over de thermische omgeving (predicted percentage dissatisfied, PPD) zal zijn. Dit model wordt in de navolgende subparagraaf besproken.



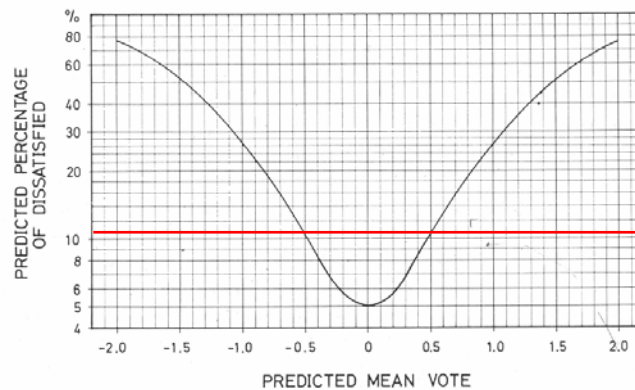
Figuur 2.1: Comfortlijnen (luchttemperatuur vs natte bol temperatuur met de RV (links) en de luchtsnelheid (rechts) als parameter [bron: Fanger, 1970]

2.2.2 PMV en PPD

Fanger veronderstelde bij het opstellen van het PMV/ PPD-model dat de mate van discomfort afhangt van de thermische belasting. Hij definieerde dit als het verschil tussen de interne warmteproductie en het warmteverlies naar de omgeving. Hierbij werd er vanuit gegaan dat de waarden voor de huidtemperaturen en de zweethoeveelheden, die vereist zijn voor het bewerkstelligen van thermisch comfort op een gelijk niveau gehouden werden (voor een bepaald activiteitsniveau). In thermisch comfortabele condities zal de thermische belasting gelijk zijn aan nul. Voor afwijkingen van deze condities zal de thermische sensatie een functie zijn van de thermische belasting en het activiteitsniveau. Het PMV model (Appendix 1) werd gebaseerd op data die verkregen werd uit onderzoeken van Nevins et al. (1966), Fanger (1970) en McNall et al. (1968). De thermische sensatie werd door de proefpersonen weergegeven op een schaal zoals die in tabel 1 [Fanger, 1970; Parsons, 2003; ISO 7730, 2005].

Vervolgens werd uit dezelfde data een relatie gelegd tussen het percentage ontevreden gebruikers en de gemiddelde thermische sensatie. Deze relatie werd vastgelegd in het zogenaamde PPD-model (Appendix 1).

De relatie tussen de PMV en PPD is weergegeven in figuur 2.2.



Figuur 2.2: Relatie tussen PMV en PPD, de rode lijn representeert de comfortgrens [bron: Fanger, 1970]

2.3 Lokaal discomfort

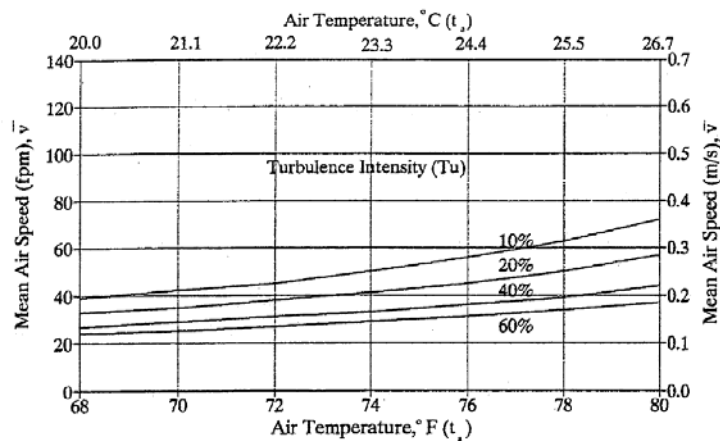
Discomfort kan ontstaan doordat het hele lichaam te koud of te warm is, maar kan ook ontstaan doordat slechts een deel van het lichaam te koud of te warm is. Zoals in de vorige paragraaf al als vierde conditie voor het bewerkstelligen van thermisch comfort werd aangegeven, dient lokaal discomfort niet aanwezig te zijn. Lokaal discomfort kan door verschillende oorzaken ontstaan, deze worden in het navolgende besproken.

2.3.1 Tocht

Één van de belangrijkste oorzaken van lokaal discomfort is tocht. Tocht wordt door de ISO 7730 (2005) gedefinieerd als 'ongewenste lokale koeling van het lichaam, veroorzaakt door luchtbewegingen'. Het ervaren van tocht is afhankelijk van de lichtsnelheid, de turbulentie-intensiteit, de luchttemperatuur, het blootgestelde lichaamsoppervlak en de thermische status van een persoon. Een persoon die het warm heeft kan een luchtbeweging als een prettige afkoeling ervaren, terwijl een andere persoon die het koud heeft dezelfde luchtbeweging als vervelend kan ervaren. In vergelijking 2.2 is een index weergegeven waarmee de mate van tocht berekend kan worden. De vergelijking mag toegepast worden voor personen die lichte, voornamelijk zittende, werkzaamheden verrichten. Tevens dient voor gebruik van deze vergelijking de thermische sensatie van de persoon dichtbij neutraal te zijn. Door de ISO norm 7730 (2005) wordt opgemerkt dat de tocht ervaring overschat kan worden op voet- en handniveau. Een relatie tussen de turbulentie-intensiteit, luchttemperatuur en lichtsnelheid is weergegeven in figuur 2.3.

$$DR = (34 - t_a)(v - 0.05)^{0.62} (0.37 \cdot v \cdot T_u + 3.14) \quad (2.2)$$

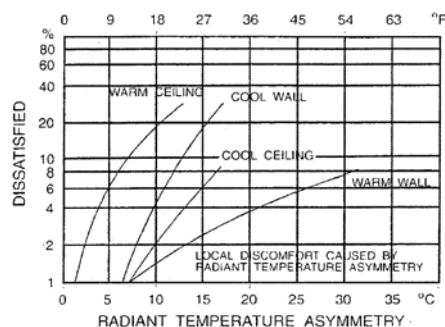
Hierbij dient te worden opgemerkt dat de lichtsnelheid gemeten dient te worden met een 'omnidirectional' anemometer., met een tijdsconstante van 0,2s.



Figuur 2.3: Toegestane luchtsnelheid als functie van de luchtsnelheid en de turbulentie-intensiteit
[bron: ASHRAE standaard 55, 2004]

2.3.2 Asymmetrische straling

De meeste omgevingen hebben in een zekere mate een asymmetrisch stralingsveld. Als deze asymmetrie voldoende groot is kan dit leiden tot discomfort. De stralingstemperatuur van een vlak (T_{pr}) beschrijft de straling in één richting. Het asymmetrische stralingstemperatuurverschil (ΔT_{pr}) is het verschil tussen de stralingstemperatuur van twee overstaande vlakken. Olesen legde in 1985 een relatie tussen het asymmetrische temperatuurverschil en het thermisch discomfort [Parsons, 2003 pp. 217]. Er werd geconcludeerd dat voor mensen in lichte kleding en een activiteitsniveau dat overeenkomt met 'zittend', het asymmetrische stralingstemperatuurverschil van koude oppervlakken (zoals de wanden) kleiner zou moeten zijn dan 10°C . Voor een warm plafond zou dit kleiner dienen te zijn dan 5°C [Olesen, 1985a; Parsons, 2003; ASHRAE, 2004 ISO 7730, 2005]. Deze waarden gelden indien aangehouden wordt dat het percentage ontevreden personen niet groter mag zijn dan 5%. De relatie tussen het aantal ontevreden personen ten gevolge van een asymmetrische stralingstemperatuurverschil tussen twee vlakken is weergegeven in figuur 2.4.

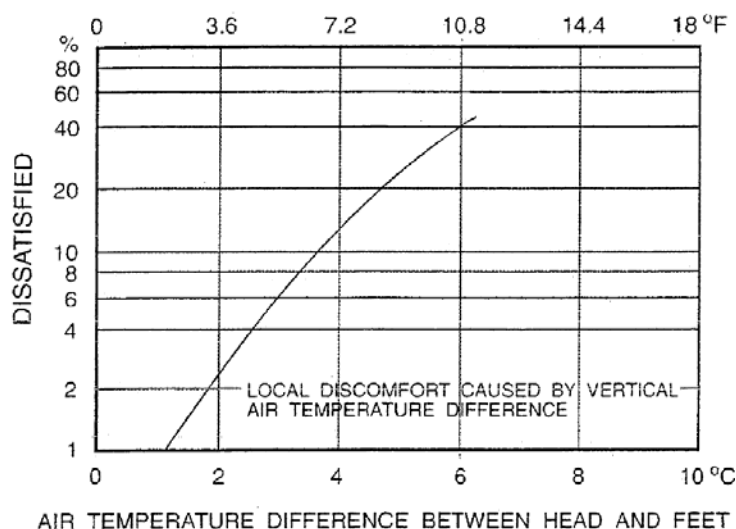


Figuur 2.4: Percentage ontevreden personen door stralingsasymmetrie
[bron: ASHRAE standaard 55, 2004]

2.3.3 Verticale temperatuurverschillen

De temperatuur in een ruimte kan variëren over de hoogte, de breedte en de diepte van de ruimte. Deze variatie komt dikwijls voort uit een slechte menging van de lucht in de ruimte. Deze slechte menging ontstaat vaak doordat er slechts op een punt in de ruimte lucht binnenkomt. Of doordat er stralingsbronnen, zoals een radiator, op een bepaalde plek in de ruimte zijn opgesteld. De belangrijkste oorzaak voor verticale temperatuurverschillen ontstaat door het fenomeen dat warme lucht opstijgt. Hierdoor is het ter plaatse van het hoofd vaak warmer dan ter plaatse van de voeten. Vooral in, relatief, kleine ruimten speelt dit een rol. Als deze temperatuurgradiënt voldoende groot is kan er ten gevolge hiervan lokaal discomfort ontstaan. Met behulp van vergelijking 2.3 kan het percentage ontevreden personen berekend worden als functie van het temperatuurverschil tussen het hoofd en de enkels. In figuur 2.5 is deze relatie grafisch weergegeven. Hierbij wordt opgemerkt dat mensen minder gevoelig zijn voor afnemende temperaturen (als de temperatuur nabij het hoofd lager is dan nabij de voeten) [Parsons, 2003; ASHRAE, 2004].

$$PD = \frac{100}{1 + e^{(5.76 - 0.856 \cdot \Delta t_{a,v})}} \quad (2.3)$$



Figuur 2.5: Percentage ontevreden personen door een verticaal temperatuurverschil tussen hoofd en voeten (indien het hoofd warmer is dan de voeten) [bron: ASHRAE standaard 55, 2004]

3. Thermoregulatie van de mens

3.1 Algemeen

Thermoregulatie kan gedefinieerd worden als ‘het vermogen van een organisme om de lichaamstemperatuur te handhaven’ [Hensel, 1981]. Ieder organisme heeft een ideale lichaamstemperatuur (afhankelijk van de omstandigheden) waarbij optimaal gefunctioneerd kan worden. Voor de mens is deze temperatuur, onder normale condities en zonder inspanning, nabij de 37°C. De warmtebalans, die in het vorige hoofdstuk is geïntroduceerd, beschrijft hoe het lichaam deze kerntemperatuur kan waarborgen. Deze warmtebalans beschrijft dit in termen van interne warmteproductie en warmte-afgifte aan de omgeving. In deze balans wordt dit als een statisch fenomeen beschreven met constante temperaturen, echter in werkelijkheid is dit een dynamisch evenwicht. Als de omgevingstemperaturen veranderen, dan reageert het lichaam hierop door het reguleren van de kerntemperatuur (het doel is om deze temperatuur zo constant mogelijk te houden). Tevens bestaat er een onder- en bovengrens voor de kerntemperatuur. Als deze grenzen overschreden worden kunnen de vitale lichaamsfuncties afnemen. In het geval dat de bovengrens overschreden wordt, wordt er gesproken van oververhitting ofwel hyperthermie (in de volksmond koorts genoemd). Bij onderkoeling wordt er gesproken over hypothermie.

Om de optimale lichaamstemperatuur constant te kunnen houden dient de warmte-afgifte van het lichaam gelijk te zijn aan de, in het lichaam, geproduceerde warmte (zie paragraaf 2.2). Het lichaam kan deze warmtebalans in evenwicht houden door verschillende fysische processen (passief) en thermoregulatie (actief). In de navolgende paragrafen worden deze twee mechanismen nader toegelicht.

3.1 Fysische processen

De warmte in het lichaam wordt geproduceerd in de cellen van de kern van het lichaam. Deze warmteproductie vindt voornamelijk plaats in de hersenen, het hart en de lever [Arens et al., 2006]. De cellen dienen er voor te zorgen dat de kerntemperatuur altijd constant is (homeotherm). Het omzetten van de chemische energie uit voedsel in warmte, maar ook in inwendige en uitwendige arbeid, wordt het metabolisme genoemd. Slechts een klein deel van de geproduceerde energie wordt omgezet in uitwendige arbeid. Het metabolisme wordt uitgedrukt in de geproduceerde energie per vierkante meter huidoppervlak (W/m^2). Het metabolisme kan ook worden gerelateerd aan de lichaamsoppervlakte en wordt dan uitgedrukt in met ; 1 met is gelijk aan een metabolisme van $58,15 \text{ W/m}^2$. In tabel 3.1 is een overzicht weergegeven van het metabolisme bij verschillende activiteiten. De geproduceerde warmte wordt vanuit de kern, voornamelijk door geleiding (conductie), getransporteerd naar de omgeving. Dit warmtetransport vindt plaats door het temperatuurverschil tussen de kern en de omgeving. Daarnaast vindt er ook warmtetransport plaats door stroming (convectie). Dit

transport wordt bewerkstelligd door de beweging van extracellulaire vloeistoffen, zoals bloed. Het warmtetransport vanuit de kern is een dynamisch en complex systeem. Dit transport hangt af van de thermofysieke en fysiologische eigenschappen, zoals de thermische geleiding, de dichtheid, de specifieke warmte, en de doorbloeding (perfusie) van de cellen en weefsels. Als het lichaam zijn warmte niet zou kunnen afgeven aan de omgeving dan zou er geen warmte-uitwisseling plaatsvinden tussen het lichaam en de omgeving (ook al zouden er warmte-uitwisselingen in het lichaam plaatsvinden). In dit geval zou de warmte opgeslagen worden in het lichaam. Als gevolg hiervan zou de lichaamstemperatuur ongeveer met 1°C per uur stijgen voor een persoon in zittende toestand. In de meeste gevallen is er echter sprake van een effectief temperatuurverschil tussen de kern van het lichaam en de huid, waardoor er warmtetransport plaats vindt tussen de cellen in het lichaam en de huid. Vanuit de huid en de longen kan de warmte afgegeven worden aan de omgeving door geleiding, convectie, straling en verdamping.[Hensel, 1981; Parsons, 2003].

Uit bovenstaande blijkt dat de thermische eigenschappen van de botten, spieren, vet, bloed etc. belangrijk zijn voor het interne warmtetransport en de warmte-afgifte naar de omgeving. Echter om de temperatuur ook goed te kunnen reguleren in een dynamische omgeving dient er naast dit passieve systeem ook een actief regulatiesysteem aanwezig te zijn. Dit actieve systeem dient het passieve systeem te 'beheersen'. In de navolgende paragraaf zal het thermoregulatiesysteem besproken worden.

Tabel 3.1: Het metabolisme bij verschillende activiteiten [bron: ISO 7730, 2005]

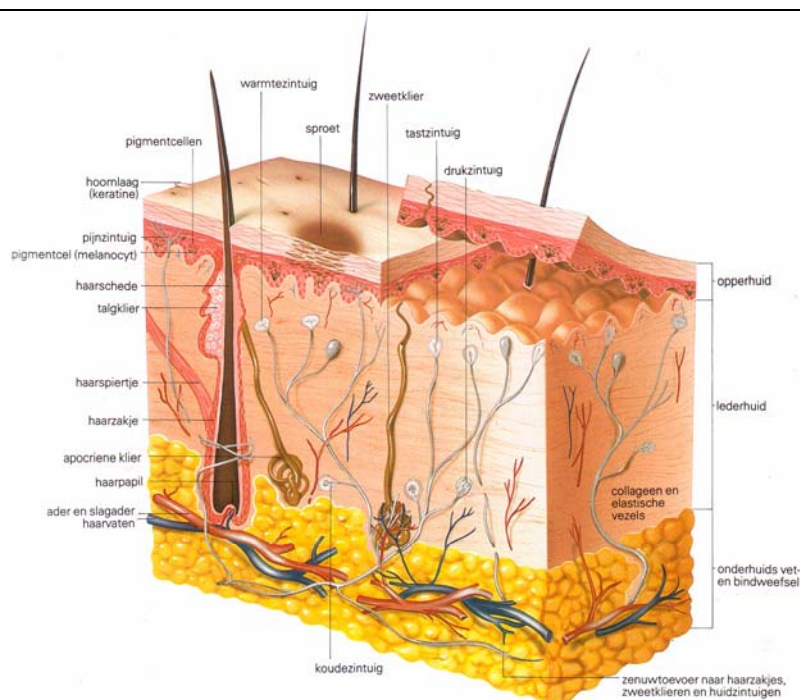
Activiteit	Metabolisme	
	W/m^2	<i>met</i>
Liggen	46	0.8
Zitten, rustig	58	1.0
Lichte activiteit, zittend (kantoor, huis, school, laboratorium)	70	1.2
Lichte activiteit, staand (winkelen, laboratorium, lichte industrie)	93	1.6
Middelzware activiteit, staand (winkelverkoper, huishoudelijk werk, machinaal werk)	116	2.0
Lopen (op gelijk niveau):		
2 km/h	110	1.9
3 km/h	140	2.4
4 km/h	165	2.8
5 km/h	200	3.4

3.2 Thermoregulatie

Thermoregulatie vindt plaats door biologische aanpassingen van het lichaam, zoals vasoconstrictie (vaatvernauwing), vasodilatatie (vaatverwijding) of door gedragsaanpassing. Met behulp van thermoregulatie kan het lichaam actief reguleren op veranderende omgevingstemperaturen. Er wordt in de literatuur een onderscheid gemaakt tussen het autonome thermoregulatiesysteem (biologische aanpassingen) en thermoregulatie door middel van gedrag (gedragsaanpassingen). Om actief te kunnen regelen op veranderende omgevingstemperaturen, dienen deze waargenomen te worden door het lichaam. De mechanismen die dit waarnemen worden besproken in paragraaf 3.3.1.

3.3.1 Thermoreceptie

Thermoreceptie kan gedefinieerd worden als 'een proces waarbij op verschillende niveau's warmte-energie (temperaturen) waargenomen wordt door levende organismen' (Hensel, 1981). Thermoreceptoren nemen de temperatuur waar in de huid en op verschillende locaties in de lichaamskern. Deze waarnemingen worden vervolgens doorgegeven aan de hypothalamus. Vanuit dit gedeelte in de hersenen wordt het autonome thermoregulatiesysteem (paragraaf 3.3.2) geactiveerd. Het thermoregulatiesysteem wordt geactiveerd als de temperatuur lager of hoger is dan de gewenste referentietemperatuur [Stolwijk, 1971].

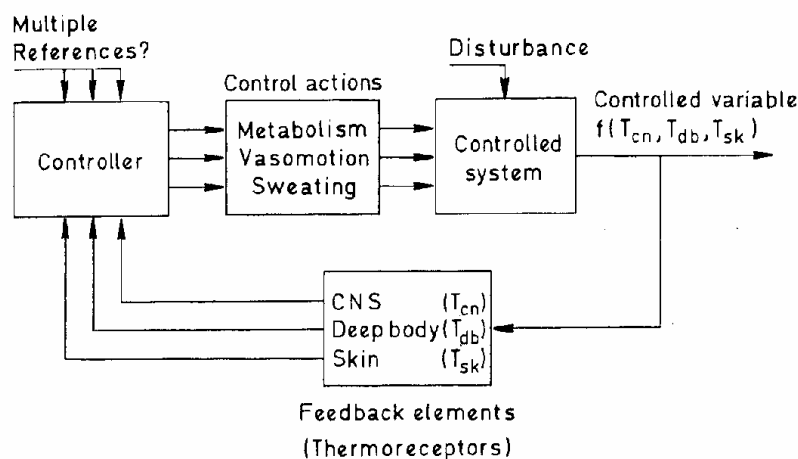


Figuur 3.1: Structuur van de menselijke huid [bron: Weston, 2004]

Er wordt een onderscheid gemaakt in warme- en koudereceptoren. De huid bestaat uit twee weefsellagen, de opperhuid en de lederhuid (respectievelijk het epidermis en het dermis), en beide lagen bevatten warmte- en koudereceptoren (zie figuur 3.1). Er zijn minder warmtereceptoren in de huid aanwezig dan koudereceptoren (de verhouding is ongeveer 1:10). Hierdoor is het menselijke lichaam gevoeliger voor kou dan voor warmte [Arens et al., 2006].

3.3.2 Autonome thermoregulatiesysteem

Het autonome thermoregulatiesysteem van de mens is een complex systeem. Het systeem bestaat uit verschillende regulerende mechanismen. Het systeem bevat meerdere sensoren, meerdere feedback loops en meerdere outputs [Hensel, 1981]. In figuur 3.2 is dit systeem schematisch weergegeven. De variabele die gereguleerd wordt is niet de temperatuur van een bepaald deel van het lichaam (zoals de temperatuur van de hypothalamus), maar een geïntegreerde waarde van meerdere temperaturen met andere woorden een gewogen gemiddelde lichaamstemperatuur. De setpoint temperaturen waarbij de verschillende aanpassingsmechanismen, zoals vasoconstrictie, in werking komen zijn niet noodzakelijkerwijs identiek.



Figuur 3.2: Schematisch diagram van het menselijke autonome thermoregulatiesysteem [bron: Hensel, 1981]

Verstoringen in de lichaamstemperatuur treden voornamelijk op door interne warmteproductie en door koude of warme omgevingstemperaturen. Bij een veranderende omgevingstemperatuur zorgen signalen vanuit de thermoreceptoren ervoor dat de temperatuurverstoringen opgemerkt worden voordat deze de lichaamskern bereiken. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de thermoreceptoren niet alleen reageren op de veranderende temperatuur maar ook op de snelheid waarmee deze temperatuur verandert. Dit mechanisme

is zo effectief dat een snelle afkoeling of opwarming kan resulteren in een tijdelijke tegenovergestelde verandering van de kerntemperatuur.

Zoals eerder al genoemd werd, beschikt het thermoregulatiesysteem over een aantal regelmechanismen. Deze mechanismen zorgen ervoor dat de kerntemperatuur actief geregeld kan worden bij veranderende omgevingstemperaturen en een veranderende kerntemperatuur. Deze mechanismen worden in het navolgende toegelicht.

Vasomotie

Om de warmteafgifte naar de omgeving te beïnvloeden beschikt het lichaam over de mogelijkheid om de bloedtoevoer naar de aderen aan te passen. Indien de kerntemperatuur dreigt te verhogen kan het lichaam meer warmte aan zijn omgeving af geven door de doorbloeding naar de extremiteiten (uiterste lichaamsdelen, zoals vingertoppen en uiteinden van de tenen) te verhogen. Om dit te kunnen realiseren worden de bloedvaten verwijd, en hiermee kan er op een adequate manier meer warmte aan het omringende weefsel worden afgegeven. Het verwijderen van de aderen wordt ook wel vasodilatatie genoemd. Indien er vasodilatatie optreedt, neemt de temperatuur van de extremiteiten toe.

Indien er sprake is van afkoeling, en het lichaam de warmteafgifte naar zijn omgeving wil beperken treedt het omgekeerde verschijnsel op. De vaten vernauwen zich, waardoor het warmteverlies naar het omringende weefsel wordt beperkt. Dit verschijnsel wordt vasoconstrictie genoemd. Indien er vasoconstrictie optreedt wordt er wel voldoende bloed toegevoerd naar de cellen, zodoende dat het zuurstofniveau, ten behoeve van de celactiviteit, op peil gehouden kan blijven. Bij vasoconstrictie neemt de temperatuur van de extremiteiten af.

In een thermoneutrale situatie wisselen vasodilatatie en vasoconstrictie elkaar voortdurend af. De periode van deze wisselingen ligt in de orde grootte van één minuut (Hensel, 1981). De mate waarin vasoconstrictie optreedt kan bepaald worden door het verschil in huidtemperatuur tussen de onderarm en de vingertop. Er treedt vasoconstrictie op vanaf een temperatuurverschil van 0°C [Rubinstein en Sessler, 1990; Sessler, 2003].

Pilo-erectie

Pilo-erectie, in de volksmond 'kippenvel' genoemd, ontstaat als de huid afkoelt. Hierbij gaan de haartjes op de huid overeind staan. Het doel hiervan is om het warmteverlies te reduceren door een dunne laag stilstaande lucht te creëren tussen het lichaam en zijn omgeving. Echter, tegenwoordig speelt dit mechanisme geen significante rol meer in de thermoregulatie. De mens heeft ten opzichte van vroeger relatief weinig beharing en in de meeste gevallen wordt er kleding gedragen [Parsons, 2003].

Rillen

Indien vasoconstrictie niet voldoende is om de kerntemperatuur op peil te houden wordt de interne warmteproductie verhoogd. De interne warmteproductie wordt verhoogd doordat de spiervezels in de buig- en strekspieren gelijktijdig asynchroon samengetrokken worden [Bligh, 1985]. Hierdoor wordt er extra warmte buiten de kern geproduceerd, waardoor er minder warmtetransport vanuit de lichaamskern plaatsvindt. Dit samentrekken van de spieren wordt rillen genoemd. De intensiteit van rillen kan variëren, en de interne warmteproductie kan toenemen met ongeveer 70 W/m² tot ongeveer 200 W/m² of meer. Zowel de huidtemperatuur als de kerntemperatuur heeft een invloed op het moment wanneer het rilmechanisme wordt ingezet. In extreem koude omgevingen kan het rilmechanisme de daling in kerntemperatuur ten gevolge van de kou tegengaan, maar het kan er ook voor zorgen dat de warmteafgifte naar de omgeving juist toe neemt [Parsons, 2003].

De warmteproductie die bewerkstelligd wordt door rillen kan berekend worden aan de hand van formule 3.1 [ASHRAE, 1997].

$$M_{shiv} = 19.4 \cdot (33.7 - T_{sk}) \cdot (36.8 - T_{cr}) \quad (3.1)$$

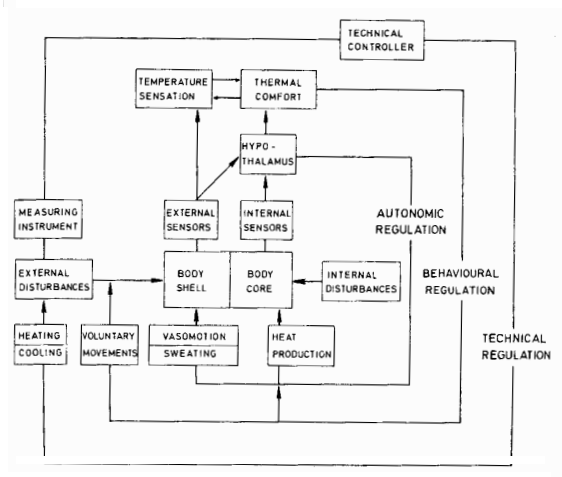
Zweten

Als er niet voldoende warmte afgegeven kan worden door vasodilatatie, dan wordt de zweetproductie in gang gezet. Door verdamping van zweet aan het huidoppervlak kan er extra warmte afgegeven worden aan de omgeving. Als de huid- en kerntemperatuur nog verder stijgen dan wordt vasodilatatie nog meer gestimuleerd door de zweetproductie. Hierdoor wordt de doorbloeding naar de zweetklieren verhoogd; dit stimuleert de aanvoer van vloeistof naar de zweetklieren [Parsons, 2003].

3.3.3 Thermoregulatie door gedragsaanpassing

In aanvulling op het autonome thermoregulatiesysteem speelt ook de regulatie door middel van gedrag een belangrijke rol in de actieve thermoregulatie. Gedragsaanpassingen hebben een groot effect op de thermische omgeving van de mens. Een eenvoudige verandering in houding, het aan- of uitdoen van kleding, exercitie etc. kan al een significant effect hebben. Ook ervaringen uit het verleden spelen een rol in de mate van gedragsaanpassing.

Een schematisch overzicht van het complete thermoregulatiesysteem is weergegeven in figuur 3.3. In dit schema zijn drie soorten temperatuurregelingen waar te nemen: het autonome thermoregulatiesysteem van de mens, temperatuurregeling door middel van gedragsaanpassing en het regelen van de temperatuur door bijvoorbeeld een klimaatinstallatie.



Figuur 3.3: Schematisch diagram van het menselijke thermoregulatiesysteem [bron: Hensel, 1981]

4. Thermofysiologische modellen

In de laatste helft van de vorige eeuw ontstond er steeds meer aandacht voor de ontwikkeling van thermofysiologische modellen. De empirische modellen (onder andere het model van Fanger) bleken geschikt te zijn voor het verklaren en voorspellen van het thermisch comfort aan de hand van de warmtebalans en subjectieve responses. Echter er ontstond ook steeds meer de vraag over hoe de warmtehuishouding in het lichaam gedetailleerd gesimuleerd kon worden, en of er aan de hand van deze gedetailleerde warmtehuishouding een uitspraak gedaan kon worden over het thermisch comfort van personen. Het grote voordeel van een dergelijk model is dat er uitspraken gedaan kunnen worden over de fysiologische responses onder extremere periodes, maar ook onder wisselende condities. Het doel van een thermofysiologisch model is om aan de hand van gesimuleerde huidtemperaturen en kerntemperatuur een uitspraak te kunnen doen over de thermische sensatie en het thermisch comfort. In de meeste modellen wordt dit bewerkstelligd door het thermoregatiesysteem van het lichaam op te delen in een passief systeem en een actief systeem zie (hoofdstuk 3).

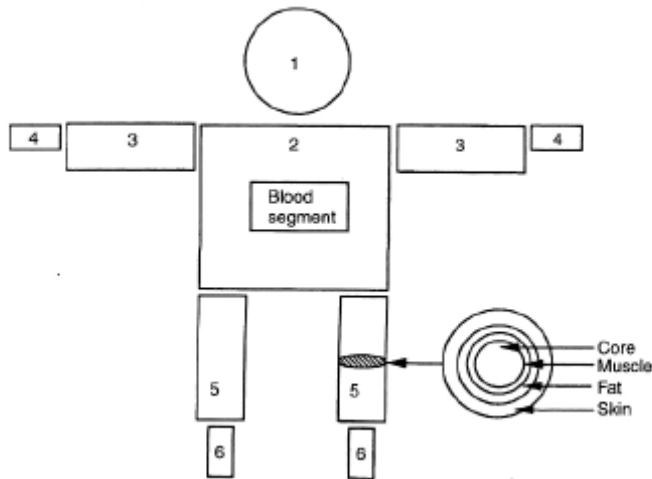
In het navolgende zullen enkele van deze ontwikkelde modellen kort besproken worden. Het model van Fiala wordt hier uitgebreider besproken, omdat dit model (in aangepaste vorm) binnen dit onderzoek gebruikt wordt voor het simuleren van de huid- en kerntemperatuur en het voorspellen van het thermisch comfort.

4.1 Het Stolwijk model

In 1971 werd door Stolwijk een thermofysiologisch model ontwikkeld dat, tot op heden, nog steeds de basis en inspiratie vormt voor vele andere thermofysiologische modellen. Dit model werd ontwikkeld voor de NASA met als doel een mathematisch model te creëren voor de thermoregulatie van de mens. Dit model was redelijk in staat om de fysiologische responses van mensen te simuleren bij verschillende omgevingstemperaturen [Stolwijk en Hardy; 1966, Stolwijk, 1971; Stolwijk en Hardy, 1977].

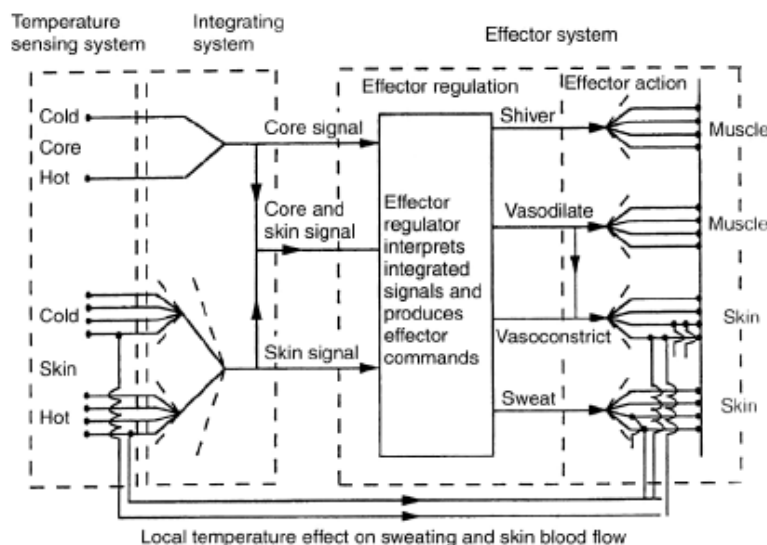
Het passieve gedeelte van het model bestaat uit vijf cilinders en een bol met aangepaste afmetingen (de afmetingen zijn bepaald aan de hand van metingen aan proefpersonen). De cilinders representeren de romp, armen, handen, benen en voeten, de bol representeert het hoofd. Elk element is opgebouwd uit vier concentrische lagen of compartimenten die het kernweefsel, het spierweefsel, het vet en de huidlagen voorstellen. Daarnaast bevat het model een centraal bloedcompartiment, welk de slagaders en grote aders vertegenwoordigt. Via dit compartiment vindt warmte-uitwisseling plaats met de andere compartimenten via convectief warmtetransport (dit treedt op bij de bloeddorstrooming naar de andere compartimenten). In het model wordt er vanuit gegaan dat het lichaam symmetrisch is opgebouwd; zo worden de benen vertegenwoordigd door één cilinder. Het totale passieve

systeem bestaat uit 25 knooppunten: vijf cilinders en een bol die elk uit vier lagen zijn opgebouwd en een centraal bloed compartiment (zie figuur 4.1).



Figuur 4.1: Schematische weergave van het passieve gedeelte van het Stolwijk model [Stolwijk en Hardy, 1977]

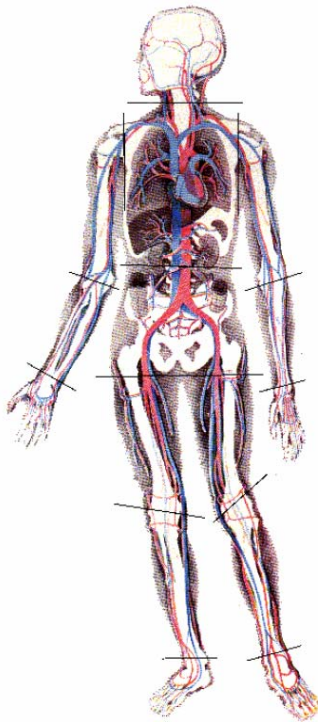
Het actieve thermoregulatiesysteem van het model neemt de omgevingstemperatuur waar en bestaat uit een integrerend systeem en een regulerend systeem. Het is een vereenvoudigde representatie van het thermoregulatiesysteem van de mens en is gebaseerd op setpoint waarden (zie figuur 4.2). De setpointwaarde is in principe voor elk knooppunt de temperatuur die het knooppunt zou hebben in een thermoneutrale toestand ($T_a=30^{\circ}\text{C}$). Als de waarde in een knooppunt afwijkt van deze setpointwaarde, dan wordt er bijgestuurd met behulp van de regelmechanismen. Binnen dit model wordt er uitgegaan van een standaard mannelijke persoon met een lengte van 1,72m en een gewicht van 74,4kg.



Figuur 4.2: Schematische weergave van het actieve gedeelte van het Stolwijk model [Stolwijk en Hardy, 1977]

4.2 Het Berkeley model

De basis voor het model van Berkeley wordt gevormd door het model van Stolwijk. Echter ook het werk dat verricht is door Tanabe in Japan heeft een bijdrage geleverd aan het model. Het originele model van Stolwijk bestond uit 6 lichaamssegmenten (zie paragraaf 4.1). Het Berkeley model bestaat uit 16 lichaamssegmenten; deze zijn weergegeven in figuur 4.3. Elk lichaamssegment bestaat, net zoals in het Stolwijk model, uit vier lagen. Deze lagen vertegenwoordigen eveneens het kernweefsel, de spieren, het vet en de huidlagen. De bloedstroom wordt gemodelleerd in aparte delen, welke door knopen vertegenwoordigd worden. Deze knopen bewerkstelligen warmte-uitwisseling tussen de lichaamssegmenten en het weefsel. Ten opzichte van het Stolwijk model is hiermee een verbetering gemaakt naar de werkelijkheid. In het model van Stolwijk werd ervan uitgegaan dat de temperatuur van het bloed door het hele lichaam gelijk was aan de temperatuur in de kern van het lichaam [Huizenga et al., 1999].



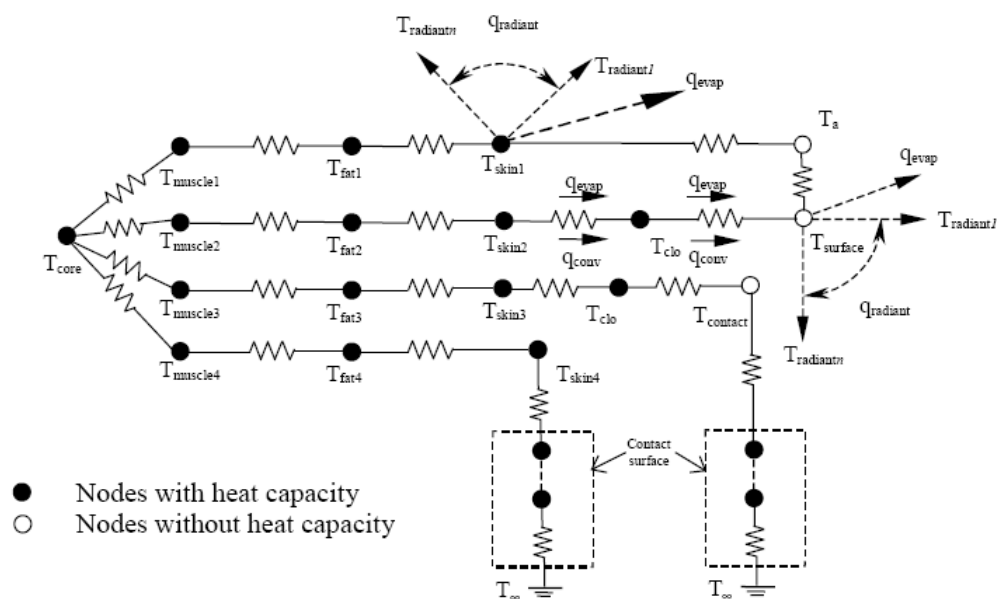
Figuur 4.3: Weergave van de 16 lichaamssegmenten in het Berkeley model [Huizenga et al., 1999]

Het Berkeley model simuleert een aantal opeenvolgende fases waarin de proefpersoon verkeerd. Hierdoor bestaat de mogelijkheid om een niet uniforme omgeving te simuleren. Elke fase die gesimuleerd wordt bestaat uit de volgende set of data:

- De duur van de fase;
- Het metabolisme;

- Fysiologische constanten, zoals vasomotie;
- Kleding (zowel de thermische weerstand als de dampdoorlatendheid);
- Luchttemperatuur, gespecificeerd voor elk lichaamselement;
- Gemiddelde stralingstemperatuur, gespecificeerd voor elk lichaamselement;
- Luchtsnelheid, gespecificeerd voor elk lichaamselement;
- Relatieve luchtvochtigheid, gespecificeerd voor elk lichaamselement;
- De thermische eigenschappen van het contactoppervlak eveneens gespecificeerd voor elk lichaamselement.

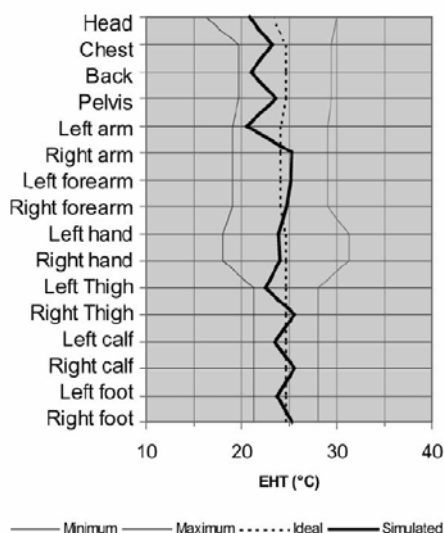
In figuur 4.4 is een schematische weergave afgebeeld van een lichaamselement. In deze afbeelding zijn er vier parallelle warmtestromen te onderscheiden. Warmteafgifte naar de omgeving vindt plaats door convectie en straling vanaf het kledingoppervlak en de onbedekte huid (respectievelijk eerste en tweede rij geschakelde warmteweerstanden). Daarnaast vindt er warmteafgifte plaats naar een contactoppervlak door geleiding via de kleding en de onbedekte huid (derde en vierde rij geschakelde warmteweerstanden).



Figuur 4.4: Schematische weergave van de warmteafgifte van een lichaamselement [Huizenga et al., 1999]

Naast het simuleren van de kerntemperaturen en de huidtemperaturen is het mogelijk om aan de hand van het model een voorspelling te doen over het thermisch comfort van een persoon in een niet-uniforme omgeving. Deze voorspelling wordt gedaan aan de hand van de EHT (Equivalent Homogeneous Temperature). Aan de hand van een ondergrens, een bovengrens en een ideale waarde voor de EHT per segment, is het mogelijk om een beoordeling te geven voor het thermische comfort (zie figuur 4.5). Binnen deze grenzen is het verwachte aantal ontevreden personen niet groter dan 20%.

Een eerste validatie van het model heeft plaatsgevonden aan de hand van gegevens die uit de literatuur verkregen zijn. Hieruit bleek dat met behulp van het model een goede voorspelling gedaan kan worden voor stationaire omstandigheden [Huizenga et al., 2001].



Figuur 4.5: Weergave EHT verdeling in Berkeley modelt [Huizenga et al., 2001]

Helaas is dit model echter niet toegankelijk voor gebruik. Er zijn weinig publicaties beschikbaar over de validatie van het model en de gebruikte vergelijkingen voor het simuleren van het actieve thermoregulatesysteem zijn onbekend. Vanwege deze redenen is het niet mogelijk om het model te gebruiken binnen dit onderzoek.

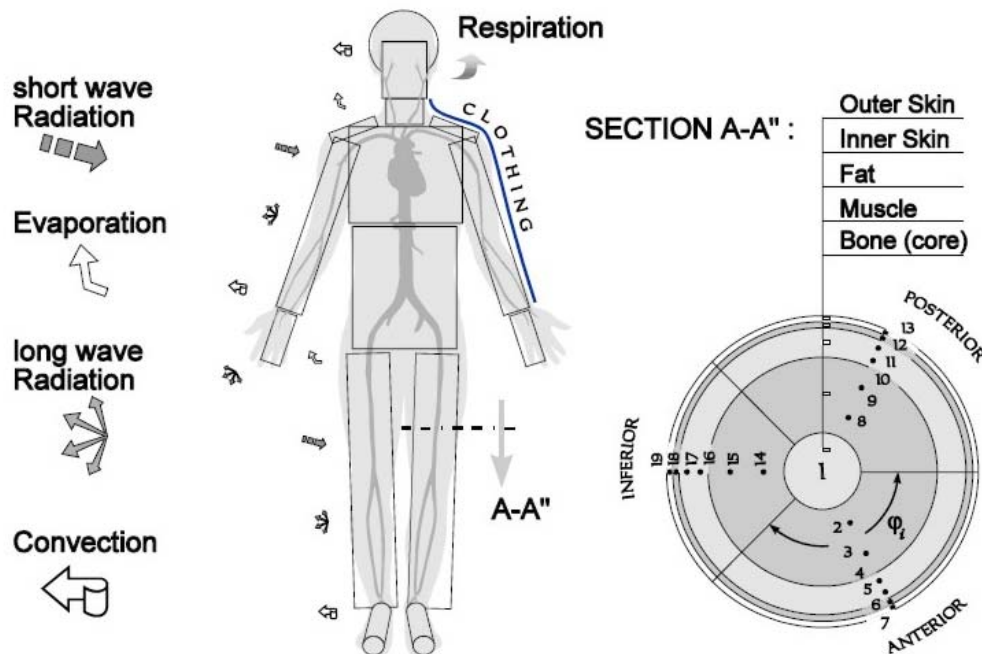
4.3 Het Fiala model

Een model dat wel toegankelijk is, is het fysiologische model dat Fiala in 1998 introduceerde. Dit model is eveneens gebaseerd op het model van Stolwijk uit 1966 [Fiala, 1998]. Binnen dit model wordt er ook uitgegaan van een standaard mannelijke persoon met een gewicht van 73,5 kg, een vetpercentage van 14, een Dubois lichaamsoppervlakte van $1,9\text{m}^2$ en een basaal metabolisme van 87,1W. Evenals het model van Stolwijk, is ook het model van Fiala opgesplitst in een passief gedeelte en een actief gedeelte. Deze worden in het navolgende toegelicht.

4.3.1 Passief systeem

Het lichaam is in dit model opgesplitst in 15 delen; 14 cilinders die de nek, de schouders, de armen, de handen, de borstkast, de buik, de benen en de voeten representeren, en een bol die het hoofd representeert (zie figuur 4.6). Ieder element is onderverdeeld in verschillende

typen weefsels, de volgende type weefsels komen voor in het model: hersenweefsel, longweefsel, botweefsel, spierweefsel, orgaanweefsel, vetweefsel en twee typen huidweefsel. Ook wordt er voor elk element, behalve het gezicht en de schouders, een onderscheid gemaakt in 3 verschillende sectoren; het anterieur, het posterieur en het inferieur. Het verschil in delen bestaat uit de manier waarop ze straling ontvangen van andere delen van het lichaam of de omgeving.



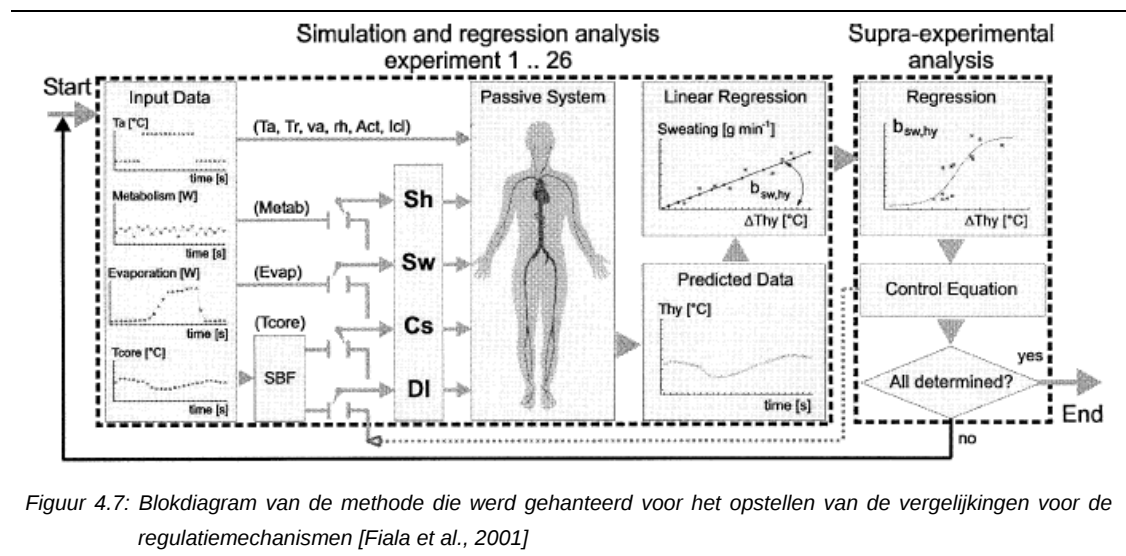
Figuur 4.6: Schematische weergave van het passieve systeem van het Fiala model [Fiala, -]

In het passieve gedeelte van het model wordt zowel de warmtehuishouding in het lichaam gemodelleerd, als de warmte-uitwisseling met de omgeving. De warmte-uitwisseling tussen de verschillende elementen in het lichaam vindt plaats door middel van bloedcirculatie (convectief warmtetransport), warmtegeleiding (conductie), interne warmte productie en warmteaccumulatie. Het model staat in wisselwerking met de omgeving door convectie, straling (kortgolvig en langgolvig) en verdamping. In het passieve gedeelte van het model wordt ook rekening gehouden met de positie van het lichaam (zittend of staand) en de bijbehorende stralingsfactoren. Daarnaast kunnen ook de thermische en hygrische eigenschappen van de kleding meegenomen worden.

Het passieve systeem werd geverifieerd aan de hand van beschikbaar analytische oplossingen voor homogene cilinders en bollen. Onder thermoneutrale situaties ($T_a=30^\circ\text{C}$) werd een goede overeenkomst gerealiseerd met de in de literatuur gevonden waarden. De gemiddelde gesimuleerde huidtemperatuur bedroeg onder deze situatie $34,4^\circ\text{C}$, en de gesimuleerde kerntemperatuur bedroeg $37,0^\circ\text{C}$ [Fiala, 1998].

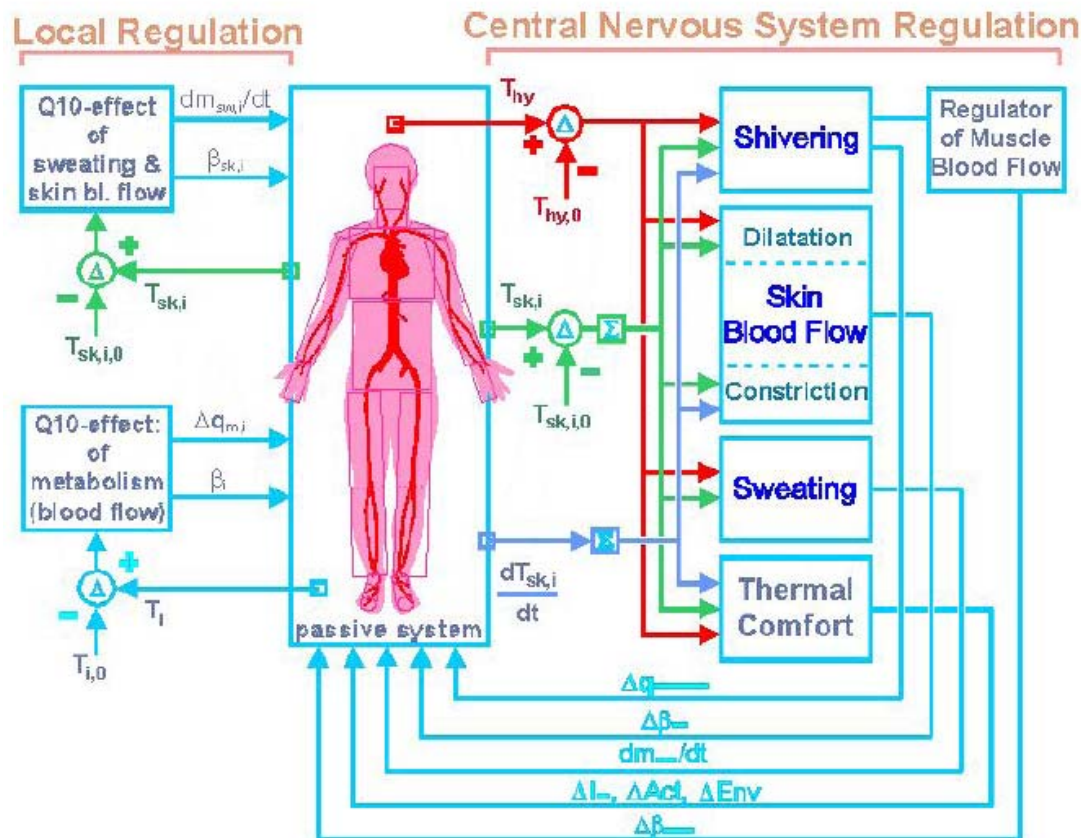
4.3.2 Actief systeem

Het actieve gedeelte van het lichaam simuleert de fysiologische responses van het thermoregulatiesysteem; vasomotie, zweetuitscheiding en verhoging in het metabolisme veroorzaakt door het rilmechanisme. De vergelijkingen voor deze verschillende thermoregulatiemechanismen zijn vastgesteld aan de hand van regressievergelijkingen die opgesteld zijn met behulp van experimenten. Deze experimenten werden uitgevoerd bij een groot aantal verschillende randvoorwaarden; de methode die hiervoor werd gehanteerd is weergegeven in figuur 4.7.



Figuur 4.7: Blokdiagram van de methode die werd gehanteerd voor het opstellen van de vergelijkingen voor de regulatiemechanismen [Fiala et al., 2001]

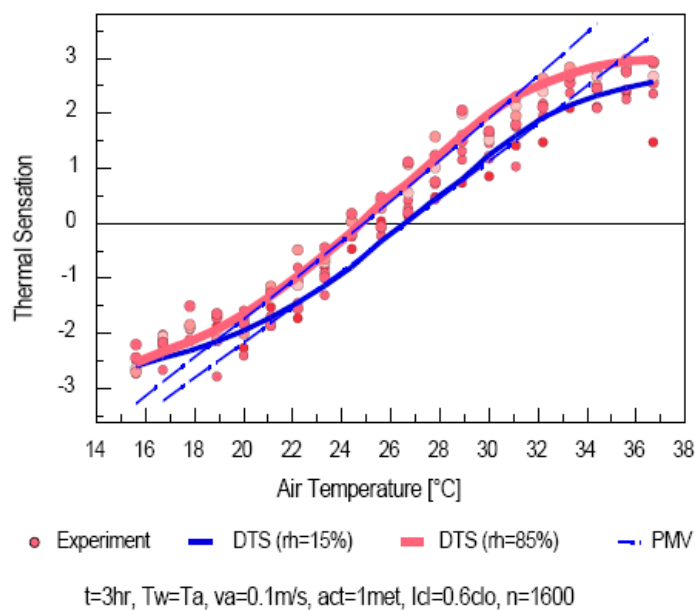
Na het uitvoerig testen en bijstellen van het model resulteerde het actieve thermoregulatiesysteem in het systeem zoals het is weergegeven in figuur 4.8. De kerntemperatuur, de gemiddelde huidtemperatuur en de snelheid waarmee de huidtemperatuur verandert zijn de parameters waarop de regelmechanismen gereguleerd worden. Het regelprincipe is gelijk aan het regelsysteem van Stolwijk; als de kerntemperatuur of de gemiddelde huidtemperatuur afwijkt van de setpointwaarde dan worden de regelmechanismen in werking gesteld [Fiala, 2001].



Figuur 4.8: Blokdiagram van de methode die werd gehanteerd voor het opstellen van de vergelijkingen voor de regulatiemechanismen [Fiala, -]

4.3.3 Dynamische thermische sensatie

In het model van Fiala werd ook een vergelijking geïmplementeerd voor het voorspellen van de dynamische thermische sensatie (DTS) aan de hand van de gesimuleerde kerntemperatuur en gemiddelde huidtemperatuur. De vergelijking die opgesteld is voor het voorspellen van de thermische sensatie is gebaseerd op een groot aantal onafhankelijke comfortexperimenten. Met behulp van een multivariabele-analyse werd vastgesteld dat de gemiddelde huidtemperatuur, de kerntemperatuur en de snelheid waarmee de gemiddelde huidtemperatuur verandert de parameters zijn die van invloed zijn op het thermisch comfort. De thermische sensatie werd beoordeeld aan de hand van de 7-punts schaal die genormeerd is in de ISO 7730 (2005) (zie paragraaf 2.1). In figuur 4.9 zijn de resultaten weergegeven van de experimenten, de voorspelde DTS en de PMV. Uit deze grafiek blijkt dat de voorspelde DTS een goede overeenkomst laat zien met de experimenten [Fiala, 1998; Fiala, -]. De vergelijking waarmee de DTS voorspeld kan worden is opgenomen in Appendix 1.

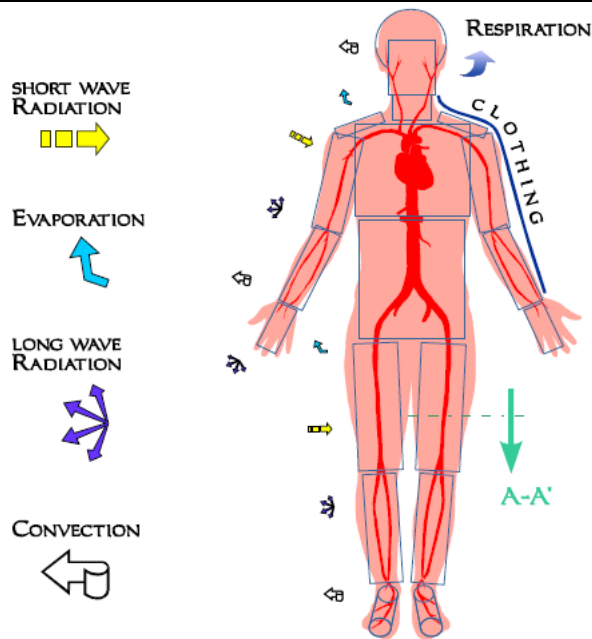


Figuur 4.9: Vergelijking gesimuleerde DTS met verrichte experimenten [Fiala, -]

4.4 Het WBTFun model

Het WBTFun model is ontwikkeld bij de Faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven in samenwerking met de Faculteit Humane Biologie van de Universiteit van Maastricht, en is gebaseerd op het Fiala model. Binnen dit onderzoek zal er gebruik gemaakt gaan worden van dit model.

Uit onderzoek bleek dat de lichaamssamenstelling een belangrijke factor is voor de individuele verschillen die ontstaan in de fysiologische responses [Marken Lichtenbelt et al., 2007]. In dit model is het mogelijk om individuele lichaamskarakteristieken, zoals lengte, gewicht en vetpercentage, mee te nemen. In het WBTFun model zijn alle lengten van de lichaamselementen, behalve het hoofd, verschaald met een factor f . Deze factor is een verhouding van de hoogte van een standaard persoon en de individuele hoogte. Het hoofd is verschaald met $\sqrt{f}$. De dikte van de huidlagen van alle lichaamsdelen is onveranderd gebleven. Daarnaast is het lichaam opgedeeld in 19 elementen (zie figuur 4.10), in plaats van de 15 elementen in het oorspronkelijke model. Deze vier extra elementen zijn gecreëerd door de armen en benen op te delen in onder- en bovenarmen en onder- en bovenbenen.



Figuur 4.10: WBTFun model met 19 elementen [Fiala, -]

Daarnaast zijn ook de vergelijkingen voor de regulatiemechanismen aangepast ten opzichte van het model van Fiala. Deze zijn aangepast aan de hand van nieuwe, recente, onderzoeken. Uit simulaties met het oorspronkelijke model is gebleken dat de gemeten gemiddelde huidtemperaturen van een gemiddelde man of vrouw kunnen verschillen tot 1,5°C van de simulaties met een standaard persoon. Door het invoeren van de individuele lichaamskarakteristieken kan dit verschil afnemen tot 0,12°C. Met behulp van dit model is het mogelijk om de huidtemperaturen van gezonde individuen op groepsniveau te voorspellen. Het model dient echter nog verder verfijnd te worden om ook op individueel niveau een nauwkeurige voorspelling te kunnen doen. Hierbij dient gedacht te worden aan het verfijnen van het bloedvatenstelsel, verfijning van de extremiteiten etc [Marken Lichtenbelt et al., 2004; Marken Lichtenbelt et al., 2007]. Het model is op dit moment dan ook nog steeds in ontwikkeling, maar de resultaten zijn zeer hoopgevend voor de toekomst.

5. Adaptieve modellen

In de laatste jaren werd duidelijk dat het PMV model van Fanger niet altijd een juiste voorspelling geeft van de thermische sensatie in een ruimte. In veel gevallen overschat het PMV model de sensatie in warme omgevingen, in koude omgevingen wordt de sensatie vaak onderschat. Hieruit kan afgeleid worden dat gebruikers van gebouwen niet altijd zo ontevreden zijn als met behulp van het PMV model voorspeld wordt. Een belangrijke oorzaak hiervan is dat gebruikers 'gewend' raken aan het klimaat en zich aanpassen hieraan; dit wordt adaptatie genoemd. Dit geldt voornamelijk voor natuurlijk geventileerde gebouwen: gebruikers zijn hier over het algemeen tevredener over het klimaat dan voorspeld wordt [Mendell, 1993; De Dear en Brager, 2001]. Een adaptief model kan beschreven worden als: een model dat het optimale comfort voorspelt als functie van het buitenklimaat [De Dear en Brager, 1998]. In het navolgende zal als eerste ingegaan worden op het begrip adaptatie, vervolgens wordt er een overzicht gegeven van de adaptieve modellen die ontwikkeld zijn in verschillende studies en de mogelijkheden voor de toekomst.

5.1 Thermische adaptatie

Volgens de Dear en Brager (1998) kan er een onderscheid gemaakt worden in verschillende soorten adaptatie; de volgende typen adaptatie worden er onderscheiden:

- Gedragmatige adaptatie;
- Fysiologische adaptatie;
- Psychologische adaptatie.

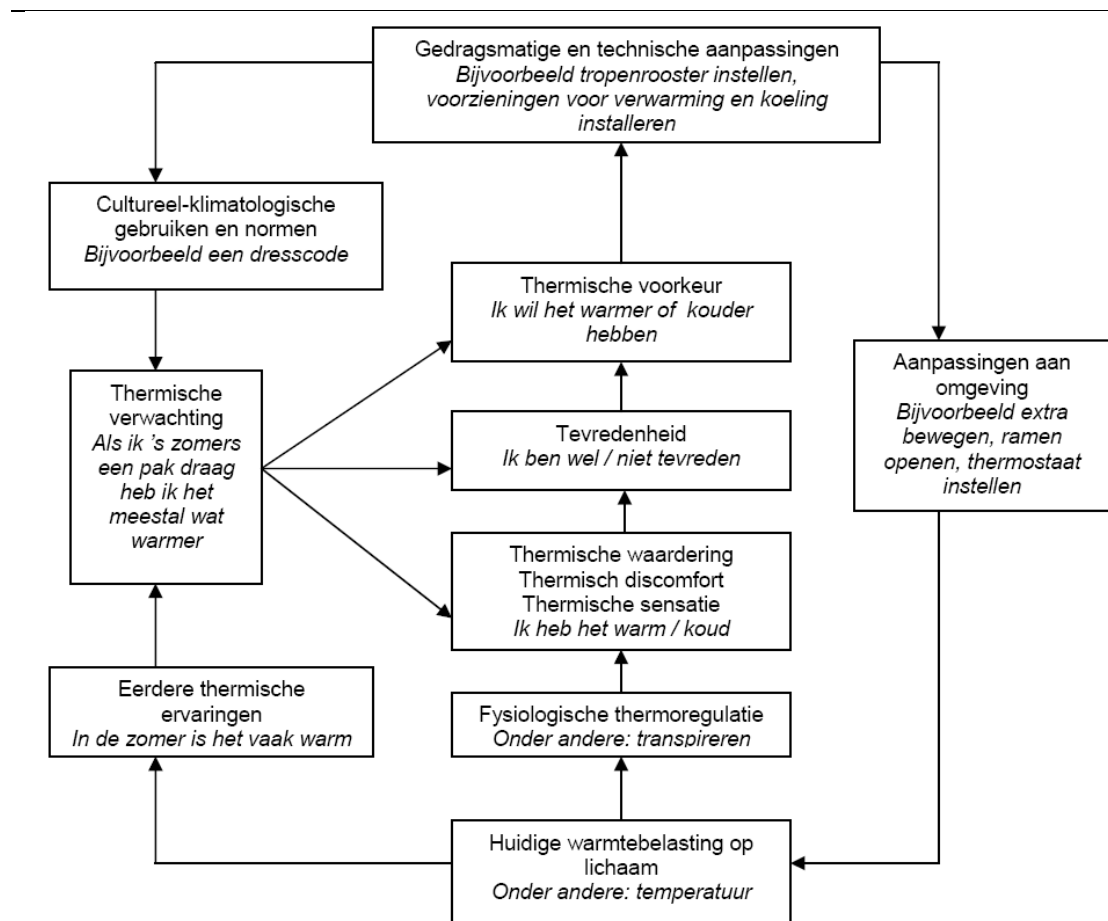
Gedragmatige adaptatie kan omschreven worden als: alle aanpassingen die een persoon bewust of onbewust doet om het evenwicht van de warmtebalans van het lichaam te herstellen, in het geval dat er sprake is van een verstoring van dit evenwicht. Gedragmatige adaptatie kan nog verder onderverdeeld worden in persoonsgebonden adaptatie (kleding aan- of uitdoen, andere houding aannemen etc.), omgevingsadaptatie (het openen of sluiten van ramen, het bijstellen van de thermostaat etc.) en organisatorische of culturele adaptatie (zoals aanpassing van de werktijden, het aanpassen van de dresscode etc.).

Fysiologische adaptatie omvat de fysiologische responses van het thermoregulatiesysteem op veranderingen in de omgevingscondities.

Psychologische adaptatie is een veranderende perceptie van, en reactie op, zintuiglijke informatie. De thermische sensatie wordt beïnvloed door de verwachtingen en ervaringen van een persoon. Aan de hand van deze verschillende typen adaptatie stelde Auliciems² een adaptief model op voor de thermische behaaglijkheid.

² De originele bron is niet vrij toegankelijk, deze informatie is afkomstig uit de ISSO 58.2 publicatie (2004)

Binnen dit model wordt de tevredenheid van een persoon direct gerelateerd aan de verwachtingen van een persoon (zie figuur 5.1).

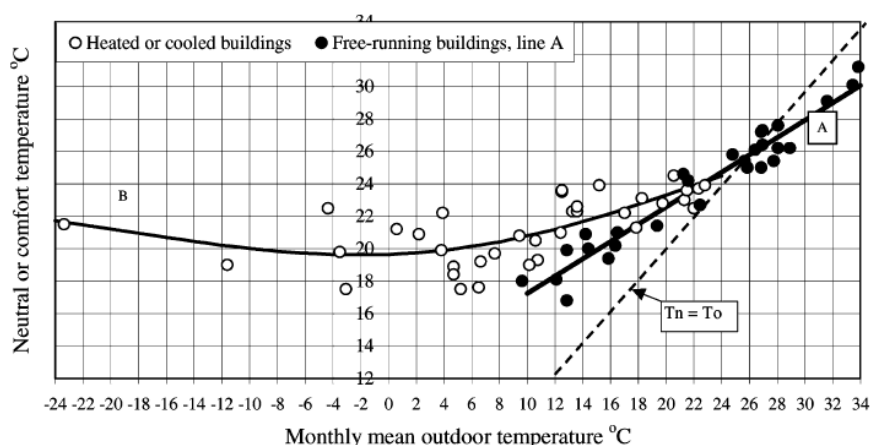


Figuur 5.1: Adaptief model voor thermische behaaglijkheid volgens Aliciems [ISSO, 2004]

5.2 Modellen

In de jaren '80 werd duidelijk dat volledig geklimatiseerde gebouwen niet altijd leiden tot een optimaal comfort. Eveneens bleek dat gebruikers in natuurlijk geventileerde gebouwen het klimaat comfortabeler beoordeelden dan gebruikers in geklimatiseerde gebouwen. Ook de aanwezigheid van SBS symptomen (zie paragraaf 6.2) is minder in natuurlijk geventileerde gebouwen [Mendell, 1993; Nicol et al., 1995; De Dear en Brager, 2001]. De Dear en Brager (1998) concludeerden ook dat gebruikers in geklimatiseerde gebouwen twee maal zo gevoelig zijn voor veranderingen in de omgevingstemperatuur. De oorzaak hiervoor kan gevonden worden in de adaptatie van gebruikers in natuurlijk geventileerde gebouwen. Gebruikers in natuurlijk geventileerde gebouwen hebben over het algemeen een minder hoog verwachtingspatroon. Ook zijn de individuele beïnvloedingsmogelijkheden in deze gebouwen,

zoals de mogelijkheid tot het openen van ramen, groter. Hierdoor kan er ook door middel van gedragsaanpassing aan het klimaat geadapteerd worden. Uit een onderzoek dat verricht werd door Nicol en Humphreys (2002) bleek dat de neutrale temperatuur steeg naarmate dat de buitentemperatuur toenam. In figuur 5.2 is aan de hand van een onderzoek in 160 gebouwen de relatie weergegeven tussen de neutrale temperatuur (de temperatuur waarbij optimaal comfort gerealiseerd wordt) en de gemiddelde maandelijkse buitentemperatuur voor natuurlijk geventileerde en geklimatiseerde gebouwen [Nicol et al., 1995; Nicol en Humphreys, 2002].



Figuur 5.2: Relatie tussen de neutrale temperatuur en de gemiddelde maandelijkse buitentemperatuur [Nicol en Humphreys, 2002]

Uit bovenstaande figuur blijkt dat gebruikers in natuurlijk geventileerde gebouwen zowel hogere als lagere temperaturen accepteren dan gebruikers in geklimatiseerde gebouwen. Met het gegeven dat eenderde van het totale energieverbruik gebruikt wordt voor het verwarmen, koelen en ventileren van gebouwen wordt de noodzaak duidelijk om te bekijken hoe de thermische adaptatie bevorderd kan worden in geklimatiseerde gebouwen.

In het navolgende zullen enkele onderzoeken besproken worden die een belangrijke bijdrage hebben geleverd aan de ontwikkeling van adaptieve modellen. Deze adaptieve modellen leggen een relatie tussen de psychologische en gedragsmatige adaptatie van de mens en het buitenklimaat.

5.2.1 De Dear en Brager (1998)

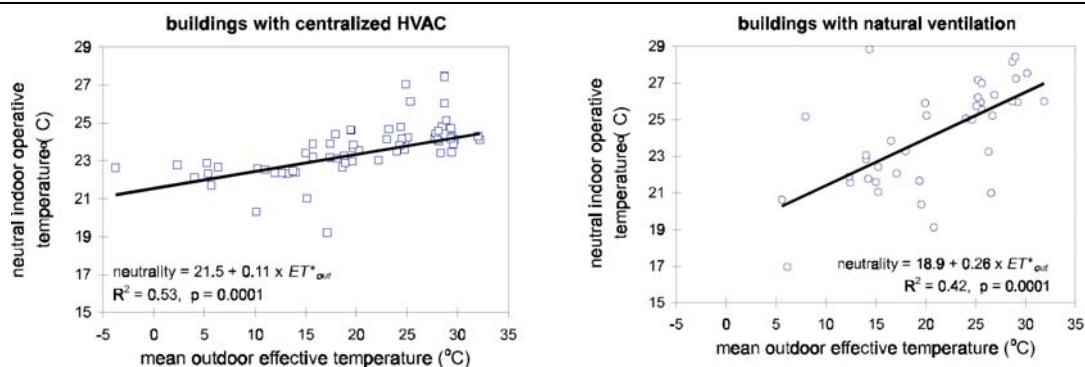
Een van de belangrijkste onderzoeken op het gebied van adaptieve modellen werd verricht door de Dear en Brager (1998). De Dear en Brager veronderstelden als hypothese dat mensen in een warm klimaat warmere binnentemperaturen prefereren dan mensen in een koud klimaat. Eveneens stelden zij dat gebruikers van natuurlijk geventileerde gebouwen een bredere temperatuurrange accepteren dan gebruikers van geklimatiseerde gebouwen,

hetgeen verklaard kan worden aan de hand van gedragsmatige adaptatie en psychologische adaptatie.

Een belangrijke vooronderstelling van het adaptieve model van De Dear en Brager is dat gebruikers van een gebouw niet langer gezien worden als passieve gebruikers, maar juist een actieve rol spelen in hun thermische voorkeuren. Daarnaast concludeerden zij aan de hand van behaalde resultaten dat de gerealiseerde thermisch neutrale temperatuur van gebruikers niet voortkomt uit acclimatisatie en gewenning, maar voornamelijk uit gedragsaanpassingen die direct een invloed hebben op de warmtebalans.

In dit onderzoek werd er gebruik gemaakt van data die verkregen werden aan de hand van ruim 21.000 metingen die verricht werden op verschillende locaties in de wereld (onder andere Engeland, Wales, Bangkok, Canada en Australië). Deze data omvatten: lucht- en stralingstemperaturen, lichtsnelheid, dauwpunttemperaturen, relatieve vochtigheden buiten, buitentemperaturen en subjectieve responses. De thermische weerstand van de kleding (hierbij werd ook de bureaustoel meegenomen) en het metabolisme werden geschat. Aan de hand van statistische analyses van de subjectieve responses werden de thermisch neutrale temperaturen gedefinieerd.

Aan de hand van de resultaten werd geconcludeerd dat gebruikers van geklimatiseerde gebouwen twee maal gevoeliger zijn voor temperatuurveranderingen dan gebruikers in natuurlijk geventileerde gebouwen. Aan de hand hiervan kan gesteld worden dat de thermisch neutrale temperatuur stijgt als het buiten warmer wordt. Deze relatie is sterker in gebouwen waar de gebruikers in verbinding staan met de natuurlijke schommelingen in het buitenklimaat (in natuurlijke gebouwen is hier sprake van). In figuur 5.3 is deze relatie die binnen het onderzoek van De Dear en Brager (1998) werd gevonden weergegeven.

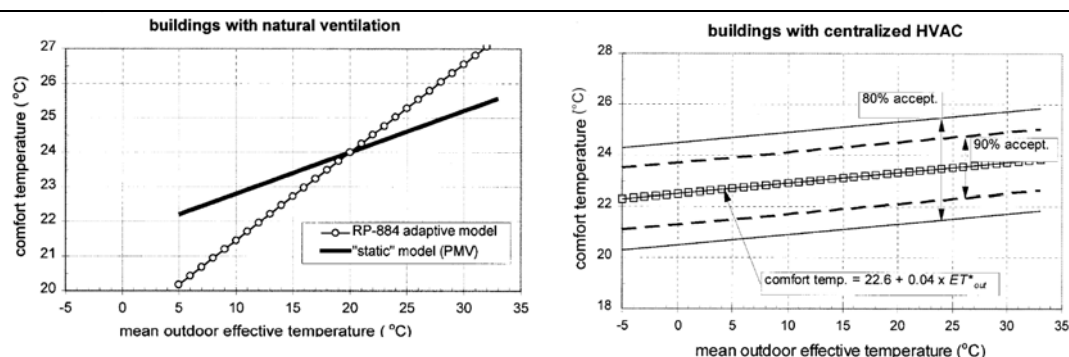


Figuur 5.3: Relatie tussen de neutrale temperatuur en de gemiddelde maandelijkse buitentemperatuur in geklimatiseerde gebouwen (links) en natuurlijk geventileerde gebouwen (rechts) [De Dear en Brager, 1998]

Daarnaast werd ook geconcludeerd dat de thermische sensaties die voorspeld werden met behulp van het PMV model goede overeenkomsten lieten zien met de geobserveerde thermische sensaties. De verschillen die ontstonden in natuurlijk geventileerde gebouwen,

tussen de geobserveerde thermische sensatie en de voorspelde thermische sensatie, zijn zeer waarschijnlijk te wijten aan psychologische adaptatie.

Binnen het onderzoek werd een adaptief PMV model (RP-884) opgesteld. Dit model voorspelt het optimale comfort als een functie van het buitenklimaat. Dit model hanteert als enige inputparameter de effectieve buitentemperatuur, in plaats van de gebruikelijke vier inputparameters (clo-waarde, metabolisme, RV en luchtsnelheid). In de linker grafiek van figuur 5.4 zijn zowel het statische PMV model (Fanger-model) als het adaptieve PMV model weergegeven voor natuurlijk geventileerde gebouwen. In de rechter grafiek is het adaptieve PMV model weergegeven voor geklimatiseerde gebouwen, eveneens zijn in deze figuur de grenzen aangegeven waarbinnen een PPD (zie paragraaf 2.2.2) van 10% (acceptability is 90%) of 20% (acceptability is 80%) behaald wordt.



Figuur 5.4: Statisch PMV model en adaptief PMV model voor natuurlijk geventileerde gebouwen (links) en het adaptieve model voor geklimatiseerde gebouwen (rechts) [De Dear en Brager, 1998]

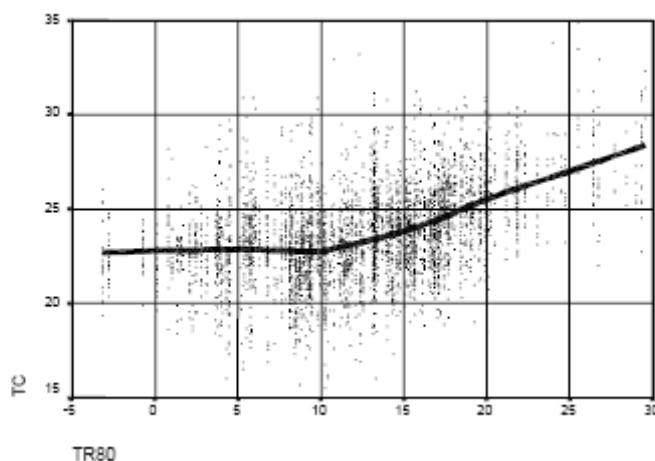
Tot slot werd er geconcludeerd dat de vooronderstelling dat de neutrale comfort temperatuur gelijk is aan de optimale temperatuur niet altijd juist is. Binnen het onderzoek wordt de aanbeveling gedaan om voor verder onderzoek een experiment te verrichten in gebouwen met een klimaatinstallatie, waarbij de temperatuureffecten bekeken worden buiten de 22-24 °C grenzen. Ook dient hierbij de binnentemperatuur meer te fluctueren, zoals in natuurlijk geventileerde gebouwen. Uit de resultaten van dit onderzoek bleek daarnaast dat gebruikers van geklimatiseerde gebouwen gewend zijn aan een kleine temperatuurrange. Echter, het voldoen aan deze comforteisen gaat vaak gepaard met een hoog energieverbruik. Gebruikers in natuurlijk geventileerde gebouwen zijn daarentegen minder gevoelig voor een grotere temperatuurrange. Indien deze grotere temperatuurrange ook toegepast kan worden in geklimatiseerde gebouwen, bestaat er een kans om het energieverbruik te reduceren. De uitdaging is om te bekijken hoe ver deze adaptatie bevorderd kan worden in gebouwen waarbij de gebruikers weinig of geen individuele controle mogelijkheden hebben.

5.2.2 McCartney en Nicol (2002)

Het belangrijkste doel van dit onderzoek was eveneens het ontwikkelen van een adaptief controle algoritme (ACA) als alternatief voor de constante setpoint waarde in gebouwen. Binnen dit onderzoek werden er in 26 gebouwen, verspreid over vijf landen in Europa (Frankrijk, Griekenland, Portugal, Zweden het Verenigd koninkrijk) metingen verricht. De volgende parameters werden gemeten: luchttemperatuur, stralingstemperatuur, RV, luchtsnelheid, CO₂-concentratie, verlichtingssterkte en geluidsniveau. Daarnaast werden er ook vragenlijsten afgenomen met betrekking tot de beoordeling van het thermisch comfort. Binnen dit onderzoek stond centraal een model te ontwikkelen dat eenvoudiger toegepast zou kunnen worden tijdens het ontwerp van een gebouw dan de bestaande adaptieve modellen. Aan de hand van een onderzoek dat verricht werd door Humphreys et al. (2000) werd geconcludeerd dat er een vaste relatie bestond tussen de thermische sensatie (TS) en de temperatuur ($T_{a;mean}$). Deze vaste relatie werd bepaald met behulp van de data die werden verkregen door De Dear en Brager (1998). De relatie tussen de temperatuur en de thermische sensatie volgens Humphreys en Nicol is weergegeven in vergelijking 5.1.

$$TS = 0,5 \cdot T_{a;mean} + a \quad (5.1)$$

Door het uitzetten van de comforttemperaturen tegen de gemiddelde buitentemperaturen (TR80) kon het ACA model verkregen worden (zie figuur 5.5).



Figuur 5.5: ACA model [McCartney en Nicol, 2002]

De regressielijn werd bepaald met behulp van de Lowess methode, dit is een explorerende methode om inzicht te verkrijgen in een relatie tussen twee parameters. Aan de hand van de grafiek kan geconcludeerd worden dat er een duidelijk verschil bestaat in de relatie tussen de TS bij een buitentemperatuur van 10°C en de TS bij buitentemperaturen hoger dan 10°C.

Het ACA model werd in twee gebouwen in de praktijk getest. In tabel 5.1 zijn de resultaten weergegeven van de thermische sensatie van de gebruikers bij zowel constante setpoint temperaturen als de temperaturen die verkregen worden bij het toepassen van het ACA model. Hieruit blijkt dat er slechts een kleine verandering optreedt bij het toepassen van het ACA model, deze verandering is niet significant. Er kan geconcludeerd worden dat er geen discomfort optreedt ten gevolge van het toepassen van ACA model.

Tabel 5.1: Vergelijking thermische sensatie bij toepassing van constante setpoint temperaturen en het ACA model voor twee verschillende gebouwen

	Neutraal (0)		Beetje koel – Beetje warm (-1 – 1)	
	Gebouw 1	Gebouw 2	Gebouw 1	Gebouw 2
Setpoint temperatuur	72%	37%	97%	84%
ACA	84%	42%	92%	84%

Aan de hand van computersimulaties werd eveneens geconcludeerd dat het ACA model grote mogelijkheden biedt voor het reduceren van het energieverbruik. Tot slot wordt er onder andere de aanbeveling gedaan dat er richtlijnen opgesteld dienen te worden voor het optimale klimaatbeheersingssysteem voor verschillende typen gebouwen.

5.2.3 Nicol en Humphreys (2002)

Binnen het onderzoek van Nicol en Humphreys (2002) werd er gezocht naar de criteria waaraan adaptieve modellen dienen te voldoen, met als doel de implementatie in normen. Aan de hand van een groot aantal onderzoeken concludeerden Nicol en Humphreys onder andere het volgende:

- Indien er geen individuele controlemogelijkheden aanwezig zijn in het gebouw, dan neemt het discomfort in grote mate toe;
- De relatie tussen de comforttemperatuur en de gemiddelde maandelijkse buitentemperatuur is zeer stabiel. In geklimatiseerde gebouwen is dit echter niet het geval, omdat de binnentemperatuur onafhankelijk van de buitentemperatuur geregeld wordt;
- Het gebied waarin het minste percentage ontevreden mensen gerealiseerd wordt beslaat in geklimatiseerde gebouwen ongeveer 2°C;
- Het energieverbruik en de duurzaamheid dienen een rol te spelen bij het vaststellen van nieuwe comfortnormen.

In het navolgende zullen de huidige Nederlandse normen die betrekking hebben op het thermisch comfort in een gebouw besproken worden.

5.3 Huidige comfortnormen

Binnen de Nederlandse regelgeving (Bouwbesluit 2003) worden er alleen eisen gesteld aan de thermische weerstand van gebouwconstructies. Er worden echter geen eisen gesteld met betrekking tot de thermische behaaglijkheid in gebouwen. De Rijksgebouwendienst (1999) heeft wel richtlijnen opgesteld voor het thermisch comfort in gebouwen. Omtrent de thermische behaaglijkheid wordt de volgende eis gesteld: *‘De thermische condities in een verblijfsruimte moeten zodanig zijn dat er voor de gebruikers een optimaal comfort heerst. De thermische condities in de overige ruimten moeten zodanig zijn dat er voor de gebruikers en bezoekers een optimaal comfort heerst en de voor de bedrijfsprocessen noodzakelijke temperaturen worden gerealiseerd.’* De richtlijnen van de Rijksgebouwendienst (Rgd) zijn gebaseerd op het model van Fanger, zoals het is vastgelegd in de ISO-norm 7730 (2005). Er wordt gestreefd naar een PMV die tussen de -0,5 en +0,5 ligt. Het percentage ontevreden personen mag niet meer dan 10% bedragen. Het uitgangspunt is dat de comfortgrenzen elk met maximaal 5% van de gebruikstijd op jaarbasis mogen worden overschreden. Eveneens geldt voor kantoorgebouwen die niet voorzien zijn van te openen raamdelen dat er een individuele regeling in de ruimte aanwezig dient te zijn. Daarnaast mag in de zomer de binnentemperatuur de 25,5°C grens niet overschrijden.

5.4 Conclusie

In het geval van lichte kantoorwerkzaamheden zijn de opgestelde richtlijnen zeer conservatief (Hensen, 1999). Ook de comfortgrenzen die bepaald worden aan de hand van het MPV en PPD model lijken voor kantoorgebouwen achterhaald te zijn (Berglund en Gonzalez, 1978; De Dear en Brager, 1998; Kolarik, 2005). Eveneens bleek dat de voorspelde thermische sensatie significante verschillen vertoont met de daadwerkelijke thermische sensatie. Dit speelt voornamelijk een rol in gebouwen waarbij het binnenklimaat is afgesteld op het buitenklimaat. Het PMV model overschat de sensatie in warme omgevingen, en onderschat de sensatie in koude omgevingen. Daarnaast is gebleken dat mensen in natuurlijk geventileerde gebouwen en bij variabele omstandigheden een grotere temperatuurrange accepteren.

Het is bewezen dat met behulp van een adaptief model het energiegebruik gereduceerd kan worden zonder dat het thermisch comfort nadelig beïnvloed wordt. Echter de vraag in welke mate een bredere temperatuurrange toegepast kan worden in geklimatiseerde gebouwen, met weinig individuele beïnvloedingsmogelijkheden, is nog niet beantwoord. Binnen dit onderzoek is het doel dan ook om dit te onderzoeken, en te bepalen wat de invloed van een bredere temperatuurrange is op de productiviteit en prestatie van gebruikers.

6. Productiviteit en prestatie

Er bestaat geen twijfel over het feit dat extreem koude en warme omgevingen de productiviteit en prestatie van personen beïnvloedt. Extreem koude en warme omgevingen hebben een grote invloed op de fysiologische responses van het lichaam, hierdoor kunnen in deze situaties hypothermia, hyperthermia, verwardheid, het verliezen van het bewustzijn etc. ontstaan. Wanneer deze verschijnselen optreden nemen vitale lichaamsfuncties af en is het lichaam niet meer in staat om optimaal te functioneren. Uit eerdere onderzoeken bleek ook dat de productiviteit en prestatie beïnvloed kunnen worden in gematigde situaties. [Clements-Croome, 2005]. Binnen dit onderzoek is het doel om te onderzoeken in hoeverre fluctuerende binnentemperaturen een invloed hebben op de prestatie en productiviteit van kantoorgebruikers in geklimatiseerde gebouwen. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de factoren die in eerdere onderzoeken een bewezen invloed hebben gehad op de productiviteit en prestatie van kantoorgebruikers. Daarnaast zullen de methoden die gebruikt kunnen worden om de productiviteit en prestatie te beoordelen behandeld worden.

6.1 Binnenklimaat versus productiviteit en prestatie

Thermisch discomfort kan er voor zorgen dat klachten en algemene ontevredenheid ontstaan. Dit kan leiden tot ongemotiveerde personen, indien een persoon ongemotiveerd raakt gaat de productiviteit en prestatie achteruit. Verschillende factoren hebben een invloed op het thermisch comfort (zie hoofdstuk 2). Echter niet alle factoren hebben een even grote invloed op de productiviteit en prestatie. In het navolgende zullen enkele onderzoeken die verricht zijn naar de invloed van binnencondities op de productiviteit en prestatie toegelicht worden.

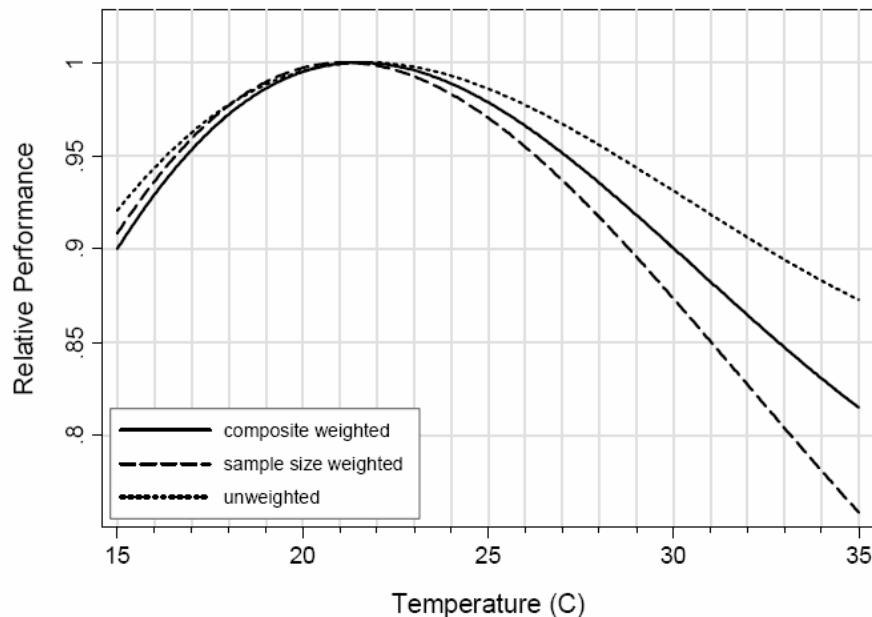
6.1.1 Temperatuur

Door Seppänen en Fisk (2005) wordt een literatuuroverzicht gegeven van verschillende laboratorium- en praktijkonderzoeken die verricht zijn naar de invloed van de binnentemperatuur op de productiviteit. De onderzoeken die zij analyseerden werden verricht in verschillende landen binnen en buiten Europa. Ook verschillende typen taken werden geanalyseerd: kantoortaken zoals tekstverwerking en de duur van gesprekken tijdens call center werk. Uit dit onderzoek kwamen de volgende conclusies naar voren:

- Er werd geen invloed gevonden op de productiviteit bij ruimtetemperaturen tussen de 20 en 25°C;

- Boven een ruimtetemperatuur van 25°C en beneden een ruimtetemperatuur van 20°C werd een afname in de productiviteit van 2% gevonden per graden temperatuurstijging/daling;

In figuur 6.1 is de kwadratische relatie tussen de ruimtetemperatuur en de productiviteit weergegeven die door Seppänen en Fisk werd gevonden.



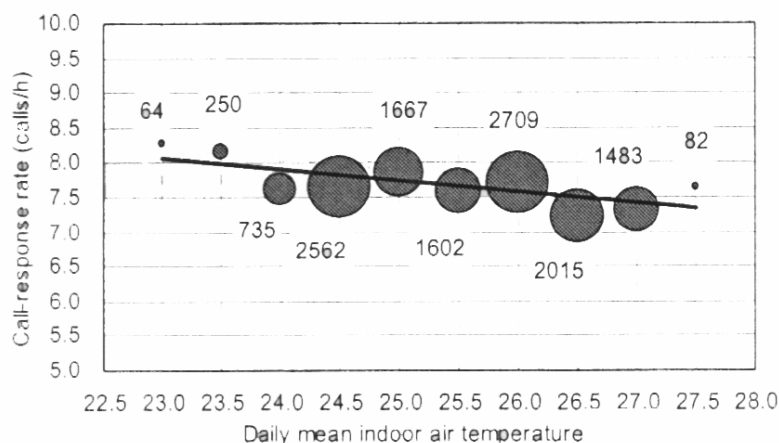
Figuur 6.1: Relatie binnentemperatuur en productiviteit [Seppänen en Fisk, 2005]

Uit een literatuuronderzoek dat verricht werd door Kolarik et al. (2005) werd geconcludeerd dat kleine fluctuaties rond de geprefereerde temperatuur resulteren in een afnemende werksnelheid en verminderde prestatie. Grotere, langzamere temperatuurfluctuaties werden gerelateerd aan snellere werksnelheden (niet significant sneller) en een prestatie die gelijk werd bevonden aan de prestatie die ook bij constante temperaturen werd gevonden. Hieruit werd geconcludeerd dat grotere temperatuurfluctuaties een positief effect kunnen hebben op de prestatie, echter deze kunnen het discomfort wel vergroten.

Toftum (2005) vond aan de hand van de resultaten van een laboratorium onderzoek dat verricht werd onder 144 personen een significant negatief effect bij het verhogen van de ruimtetemperatuur met 4°C van 20-22°C naar 22-24°C.

Tanabe (2006) verrichte een studie naar de productiviteit in callcentra in de zomer. Hierbij werden twee typen centra onderzocht: een met airconditioning en een zonder airconditioning. In het center met airconditioning bleek dat het gemiddelde aantal gesprekken per uur lager werd, naarmate de binnentemperatuur hoger werd. Het gemiddelde aantal gesprekken per uur was bij een temperatuur van 26°C gemiddeld 1% lager dan bij een binnentemperatuur

van 25°C. In figuur 6.2 is de relatie tussen het gemiddelde aantal gesprekken per uur en de ruimtetemperatuur weergegeven. In natuurlijk geventileerde gebouwen werd een optimale prestatie gevonden bij een temperatuur van 27°C, deze temperatuur kwam overeen met een gemiddelde thermische sensatie van nul (neutrale temperatuur). In dit onderzoek werd geconcludeerd dat de optimale prestatie en productiviteit gevonden kon worden bij de neutrale temperatuur; welke in natuurlijk geventileerde gebouwen hoger ligt in de zomer dan bij geklimatiseerde gebouwen.

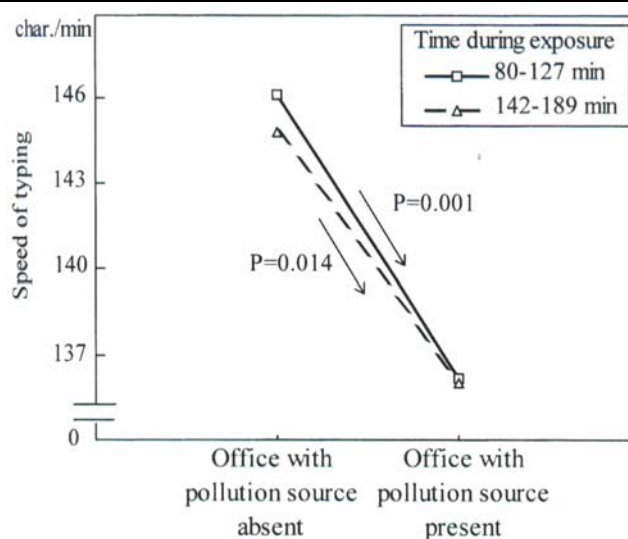


Figuur 6.2: Relatie binnentemperatuur en aantal gesprekken per uur in een call center met airconditioning [Tanabe, 2006]

Uit het literatuuronderzoek dat verricht werd bleek dat er weinig onderzoek uitgevoerd is naar het onderzoeken van de effecten op de productiviteit en prestatie bij gematigde temperatuurfluctuaties. Eveneens bleek dat er een groot verschil bestaat tussen de gevonden effecten van de temperatuur op de productiviteit en prestatie. Zo vonden Seppänen en Fisk en Tanabe geen significante invloed van ruimtetemperaturen tussen de 20 en 25°C op de prestatie en productiviteit, terwijl Toftum wel een significant negatief effect vond bij het verhogen van de temperatuur van 20-22°C naar 22-24°C.

6.1.2 Luchtkwaliteit en luchtsnelheid

In een onderzoek dat door Wargocki (1998) verricht werd bleek dat de mate van luchtvervuiling in een kantoor een invloed heeft op de productiviteit. Dit werd bepaald aan de hand van een laboratoriumonderzoek met proefpersonen. Hierbij werden er metingen verricht met en zonder de aanwezigheid van een vervuilsbron; in dit geval een vervuild tapijt. Deze bron was niet zichtbaar voor de proefpersonen. De productiviteit werd vastgesteld aan de hand van administratieve taken en tekstverwerking. In figuur 6.3 is de afname in productiviteit weergegeven bij de aanwezigheid van een vervuilsbron.



Figuur 6.3: Relatie typsnelheid en luchtkwaliteit [Wargocki, 1998]

In een later onderzoek concludeerde Wargocki et al. (2003) dat de luchtkwaliteit eveneens van invloed is op de prestatie van personen. Deze conclusie werd getrokken aan de hand van een praktijkonderzoek in callcentra, waarbij als maat voor de prestatie de gemiddelde gespreksduur werd aangehouden. Ook werd binnen dit onderzoek vastgesteld dat naarmate het ventilatievoud groter is, de prestatie stijgt.

Ook Seppänen et al. (2006) trokken een dergelijke conclusie. Binnen dit onderzoek werd een literatuurstudie verricht naar de invloed van het ventilatievoud op de productiviteit van werknemers. Hier kwam naar voren dat naarmate de verse luchttoevoer groter is, de productiviteit stijgt.

6.2 SBS symptomen

Veel gebruikers van kantoorgebouwen hebben last van vermoeidheid, luchtwegproblemen, droge huid, hoofdpijn etc. Er wordt voorondersteld dat deze klachten voortkomen uit het heersende klimaat in een kantoor, en worden daarom ook wel 'Sick Building Syndroms' (SBS symptomen) genoemd.

In vele onderzoeken door onder andere Sundell (1994), Jaakkola (1999), Milton et al. (2000), Bakó-Biró (2004) en Fang et al. (2004) werd geconcludeerd dat de aanwezigheid van SBS symptomen een grote invloed hebben op het algemeen welbevinden en de productiviteit van gebruikers. In het laatste onderzoek werd daarnaast ook geconcludeerd dat de omgeving minder acceptabel was indien de temperatuur of de relatieve luchtvochtigheid steeg. Indien de lucht als koel en droog ervaren wordt dan is de aanwezigheid van SBS symptomen kleiner.

Binnen dit onderzoek zal er ook gevraagd worden naar de aanwezigheid van SBS symptomen, om te kunnen vaststellen of er een invloed is van een variërend temperatuurverloop op de aanwezigheid van deze symptomen.

6.3 Beoordelingsmethoden

Uit bovenstaande bleek al dat er een groot aantal factoren van invloed is op de prestatie en productiviteit van gebruikers. Hierdoor is het moeilijk om een eenduidige relatie vast te stellen tussen één bepaalde factor en de productiviteit en prestatie; dikwijls zijn er meerdere factoren tegelijkertijd van invloed.

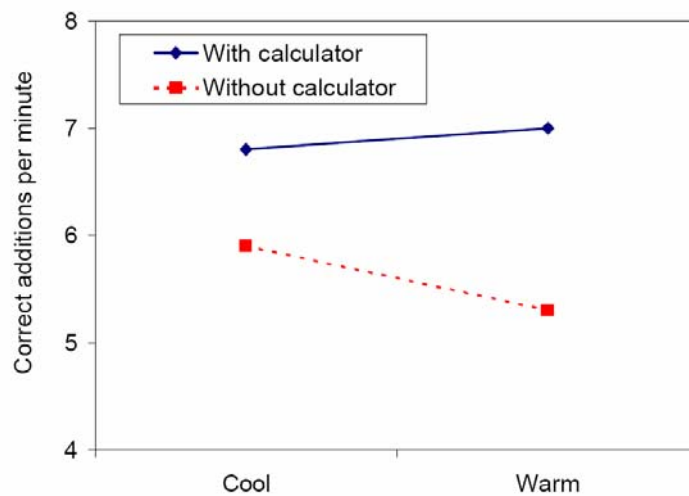
Daarnaast is productiviteit en prestatie moeilijk meetbaar. In praktijksituaties kunnen deze parameters gemeten worden aan de hand van de aard van de taken die in het betreffende gebouw worden verricht (zoals bijvoorbeeld de duur van gesprekken in callcentra). Echter, in laboratoriumsituaties is dit meestal niet mogelijk, omdat de proefpersonen hier niet in hun normale omgeving zijn en meestal verrichten zij tijdens een experiment geen normale werkzaamheden. In Denemarken is een methode ontwikkeld die het mogelijk maakt om de productiviteit en prestatie, van kantoorwerkzaamheden, onder laboratoriumcondities te meten. Deze methode zal in het navolgende toegelicht worden.

Kantoorwerk bestaat uit een groot aantal verschillende activiteiten, zoals onder andere het typen en lezen van teksten. Binnen de ontwikkelde prestatie- en productiviteitstesten wordt aangenomen dat wanneer taken zoals teksttypen, proeflezen en hoofdrekenen beïnvloed worden door veranderingen in het binnenklimaat, dat dan ook kantoorwerk in het algemeen op eenzelfde wijze beïnvloed wordt.

De methode die ontwikkeld is bestaat uit een drietal taken: een teksttaak waarbij een stuk wetenschappelijke tekst overgetypt dient te worden, een hoofdrekenaak en een teksttaak waarbij een stuk tekst gelezen dient te worden en waar vervolgens fouten in de tekst in gemarkeerd dienen te worden. Experimenten die verricht zijn ten behoeve van het testen van de methode laten significante effecten zien van de binnenluchtkwaliteit op de gesimuleerde kantoortaken bij een tijdsduur van minimaal 5 uur. Eveneens werd geconcludeerd dat het toepassen van deze methode aan het einde van de dag een groter effect heeft dan aan het begin van de dag; aan het begin van de dag zijn de proefpersonen nog alert en gemotiveerder waardoor de gevoeligheid voor omgevingscondities geringer is. Daarnaast werden zijn de taken zo geformuleerd dat elke proefpersoon telkens een nieuwe taak krijgt, waardoor het niet voorkomt dat een proefpersoon tweemaal dezelfde taak maakt. De resultaten van de taken worden uitgedrukt in termen van snelheid en nauwkeurigheid.

De methode is gevalideerd aan de hand van een onderzoek waar 144 proefpersonen aan hebben deelgenomen. De proefpersonen werden blootgesteld aan een temperatuur van 20-

22°C en 22-24°C. In figuur 6.4 zijn de resultaten van de hoofdrekentaak weergegeven met en zonder gebruik van een rekenmachine.



Figuur 6.4: Resultaten hoofdrekentaak RPM methode [Toftum et al, 2005]

Uit bovenstaande figuur blijkt dat de warmere omgeving een negatief effect heeft op het aantal correcte gemaakte opgaven per minuut. Daarnaast werd er geconcludeerd dat indien er geen denkwerk verricht dient te worden (zoals bij het gebruik van een rekenmachine) er geen invloed is van de temperatuur op de prestatie. Wanneer dit wel het geval is (zoals bij het gebruik zonder rekenmachine) is er wel een effect van de temperatuur op de prestatie [Toftum et al., 2006].

De taken die binnen dit onderzoek zijn gebruikt worden uitgebreid beschreven in hoofdstuk 7.

Deel C

Experiment

7. Methoden

In dit hoofdstuk worden de methoden behandeld die gehanteerd zijn voor het verrichten van de metingen. Allereerst komen de doelstellingen aan bod, waarna er ingegaan zal worden op de onderzoeksruimte en de proefpersonen. Vervolgens worden de opgestelde vragenlijsten en de statistische methoden, die gebruikt zijn om de resultaten van de vragenlijsten te analyseren, toegelicht. Tot slot wordt het meetprotocol behandeld.

7.1 Doelstelling

Om te bepalen of er een invloed is van fluctuaties in de binnentemperatuur op het thermisch comfort, de productiviteit en de prestatie van personen in kantoorruimten zijn er metingen verricht met proefpersonen onder gecontroleerde laboratoriumcondities.

Het doel is om aan de hand van deze metingen te beoordelen of er sprake is van een aantoonbare invloed van een dynamische klimaatregeling op het thermisch comfort, de prestatie en de productiviteit van gebruikers. Eveneens zullen de meetresultaten gebruikt worden voor het valideren van het thermofysiologisch model (zie paragraaf 4.4) dat gebruikt wordt voor het simuleren van het verloop van de huid- en kerntemperatuur en de thermische sensatie.

Om uitspraken te kunnen doen over een eventuele invloed is het van belang dat de condities waarbij de metingen verricht worden voor elke proefpersoon gelijk zijn. Dit kan alleen gerealiseerd worden als de meetomstandigheden volledig gedefinieerd en controleerbaar zijn. De onderzoeksruimte waarin de metingen verricht zijn wordt besproken in paragraaf 7.2. Ook de samenstelling van de groep proefpersonen dient goed gedefinieerd te zijn, opdat de eventuele verschillen die optreden in de meetresultaten niet te wijten zijn aan de samenstelling van de groep proefpersonen (zie paragraaf 7.3).

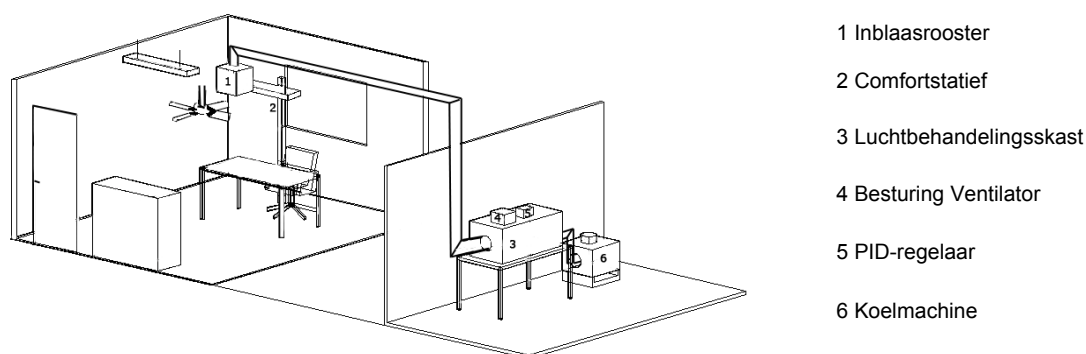
7.2 Onderzoeksruimte

De metingen zijn verricht in een in pandige kantoorruimte in het laboratorium van de unit Building Physics and Systems van de Faculteit Bouwkunde aan de Technische Universiteit Eindhoven. Een schematische weergave van de ruimte is weergegeven in figuur 7.1. De afmetingen van de ruimte zijn: $4.5 \times 3.7 \times 2.3 \text{ m}^3$ (lxbxh). Er is gekozen voor een in pandige ruimte, omdat er in eerder onderzoek is gebleken dat het buitenklimaat een grote invloed heeft op het binnenklimaat in de onderzoeksruimtes van de faculteit Bouwkunde die grenzen aan de buitenruimte [Van Oeffelen, 2007]. De ruimte grenst aan alle zijden aan

binnenruimten, hierdoor is de warmte-uitwisseling met de omgeving gering (het temperatuurverschil bedraagt niet meer dan 4°C).

De constructie van de ruimte is opgebouwd uit een houten stijl- en regelwerk. Aan deze constructie zijn de multi-board wandpanelen bevestigd. Door de lichte constructie en de geringe warmte-uitwisseling met de omgeving volgen de oppervlaktetemperaturen van de wanden de ruimtetemperatuur (dit is eveneens terug te zien in de resultaten in het volgende hoofdstuk). Op de vloer van de meetruimte is een laagpolige vloerbedekking aangebracht, hiermee wordt een hoge contacttemperatuur bewerkstelligd.

In de gekozen ruimte zijn geen ramen aanwezig, hierdoor is visueel contact met buiten niet mogelijk. De opening die zichtbaar is in figuur 7.1 vormt een kunstmatige daglichtopening, in deze opening is wit doek aanwezig. Voor de opening is een vitragesysteem aangebracht, waardoor het lijkt alsof er wel een daglichtopening aanwezig is.



Figuur 7.1: Schematische weergave onderzoeksruimte

7.2.1 Klimaatregeling

Temperatuurgrenzen

In het verleden is er veel onderzoek verricht naar de invloed van temperaturen hoger dan de optimale comforttemperatuur. Over de invloed van temperaturen kouder dan de optimale comforttemperatuur is echter nog weinig bekend (zie hoofdstuk 5). Binnen dit onderzoek is er daarom voor gekozen om ook de effecten te bekijken aan de onderzijde van de comfortgrens. De laagste temperatuur waarbij de invloed beoordeeld wordt is 17°C, bij deze temperatuur treedt het rilmechanisme van het autonome thermoregulatiesysteem nog niet in werking. Er mag aangenomen worden dat indien het rilmechanisme niet in werking gesteld wordt, dat de situatie dan niet onacceptabel koud is [Parsons, 2003]. De hoogste temperatuur waarbij de invloed beoordeeld wordt is 25°C. Deze temperatuur ligt binnen de comfortlimieten (PMV<0.5) [ASHRAE, 2004; ISO 7730; 2005].

Temperatuurverloop

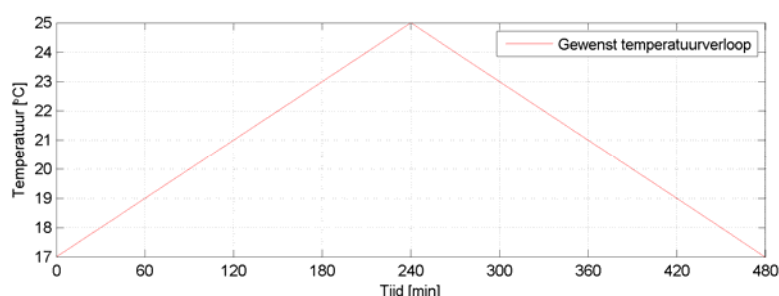
Binnen dit onderzoek is er gekozen voor een lineair temperatuurverloop als functie van de tijd. Door te kiezen voor een dergelijk temperatuurverloop kunnen de resultaten vergeleken worden met een vergelijkbaar onderzoek dat eerder verricht is door Kolarik in 2007³. Aan de hand van het vergelijken van de resultaten kunnen er dan uitspraken gedaan worden over de reproduceerbaarheid van de resultaten. Eveneens geldt dat bij een dergelijk temperatuurverloop de meetomstandigheden het beste te controleren zijn, indien er met de gekozen onderzoeksruimte en klimaatinstallatie gemeten wordt.

In het onderzoek dat Kolarik (2007) verrichtte werd er alleen gekeken naar de effecten bij een stijgend temperatuurverloop. Binnen dit onderzoek zal ook bestudeerd worden wat de effecten zijn bij een dalend temperatuurverloop gedurende het tweede gedeelte van de dag. Tevens is er binnen dit onderzoek gekozen voor een grotere temperatuurstijging per uur, zodat de gewenste temperatuurgrenzen binnen een werkdag (8 uur) bereikt kunnen worden. Door te kiezen voor een sneller temperatuurverloop kunnen de effecten van de temperatuurstijging niet vergeleken worden (de optimale temperaturen die gevonden worden kunnen wel vergeleken worden). De snelheid van de temperatuurveranderingen blijven binnen de comfortlimieten zoals die gesteld worden in de ISO norm 7730 (2005, en bedragen voor beide gedeelten van de meetsessie 2°C/h. Het gewenste temperatuurverloop gedurende de dag is weergegeven in figuur 7.2. De vergelijking voor de lineaire temperatuuroptename kan als volgt worden geschreven:

$$T_a = 17 + (t_{\text{verstreken}} \cdot \frac{2}{60}) \quad \text{voor } t_{\text{verstreken}} < 240 \quad (7.1)$$

De vergelijking voor de temperatuurafname is weergegeven in vergelijking 7.2.

$$T_a = 25 - (t_{\text{verstreken}} \cdot \frac{2}{60}) \quad \text{voor } 240 < t_{\text{verstreken}} < 480 \quad (7.2)$$

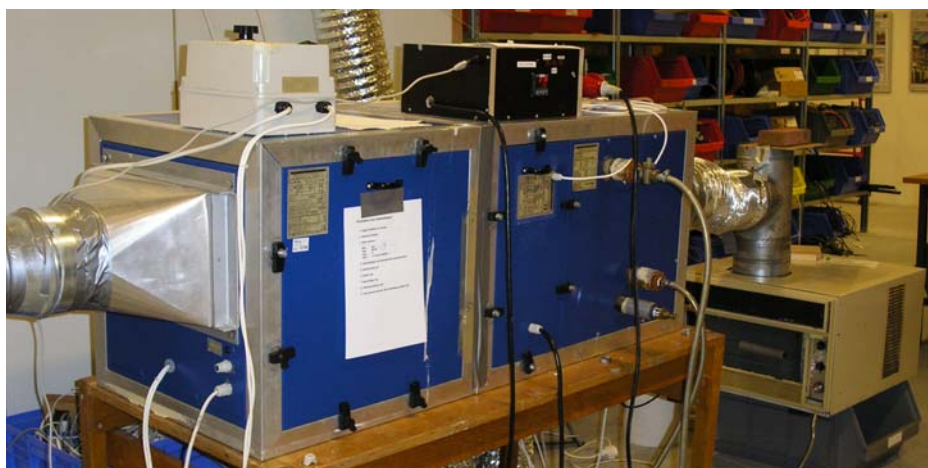


Figuur 7.2: Gewenst temperatuurverloop gedurende meetsessie

³ Dit onderzoek werd verricht in het kader van het ASHRAE Research Project 1269-RP 'Occupant Responses and Energy Use in Buildings with Moderately Drifting Temperatures'.

7.2.2 Klimaatbehandelingssysteem

Om het gewenste temperatuurverloop te kunnen realiseren is er een luchtbehandelingssysteem op de ruimte aangesloten. Dit systeem bestaat uit een koeleenheid, een verwarmingseenheid en een ventilator (Fischbach Luftungs- und Klimatechnik GmbH, type VNM). De luchtbehandelingskast brengt de lucht op mechanische wijze de ruimte in. Na proefmetingen bleek dat de aanwezige koeleenheid niet voldoende vermogen had om het gewenste temperatuurverloop te kunnen realiseren. Naar aanleiding hiervan is er een externe koelmachine op de luchtbehandelingskast aangesloten (zie figuur 7.3). Deze koelmachine koelt de lucht uit de aangrenzende ruimte tot de laagst haalbare waarde. Om de gewenste inblaas temperatuur te realiseren wordt de gekoelde lucht naverwarmd door de verwarmingseenheid in de luchtbehandelingskast. Vanuit de luchtbehandelingskast wordt de lucht op een punt in de ruimte ingeblazen via een inblaasrooster met een hoog inducerend vermogen (zie figuur 7.1). Na testmetingen bleek dat het rooster alleen niet voldoende was om een adequate menging van de lucht in de ruimte te realiseren; er ontstond een verticale temperatuurgradiënt over de ruimte. Na het aanbrengen van een plafondventilator kon een goede mening van de lucht gerealiseerd worden en bestond er geen verticale of horizontale temperatuurgradiënt meer over de ruimte. De temperatuur van de inblaaslucht wordt geregeld met behulp van een PID-regelaar (Temperature controller, West type 1600). De sensor van deze regelaar is geplaatst op het bureau nabij de proefpersoon, hierdoor kan er direct geregeld worden op de omgevingstemperatuur nabij de proefpersoon. Om aan het gestelde temperatuurverloop te kunnen voldoen, is er een inblaasdebiet van 310 m³/uur benodigd. De Rijksgebouwendienst (1999) stelt voor kantoren een eis aan het inblaasdebiet van 1,4 dm³/s per m² vloeroppervlak. In verband met de hogere bezettingsgraad in kantoortuinen wordt voor dit type kantoren een hogere eis gesteld, deze bedraagt 2,8 dm³/s per m² vloeroppervlak. Indien het minimale inblaasdebiet berekend wordt voor beide type kantoren dan bedraagt dit voor de onderzoeksruimte respectievelijk 23,3 dm³/s (83,9 m³/h) en 46,6 dm³/s (167,8 m³/h). In vergelijking met deze minimale eisen, is het inblaasdebiet dat benodigd is voor het experiment relatief hoog. Echter, er worden geen eisen gesteld aan het maximale inblaasdebiet. Met een dergelijk hoog inblaasdebiet bestaat wel het gevaar dat de benodigde inblaassnelheden en de Draught Rate oncomfortabel hoog zijn. Uit testmetingen bleek dat dit in deze meetopstelling niet aan de orde is.



Figuur 7.3: Luchtbehandelingssysteem

7.2.3 Relatieve luchtvochtigheid

De lucht, die in de ruimte ingeblazen wordt, wordt eerst door de koelmachine volledig afgekoeld. Hierdoor condenseert de waterdamp die zich in de aanvoerlucht bevindt, en daalt de absolute luchtvochtigheid van de toevoerlucht. Vervolgens wordt deze lucht naverwarmd, waardoor de RV verder daalt. Uit testmetingen bleek dat de RV op bepaalde momenten beneden de 20% daalde. Ten gevolge van een dergelijk lage RV kunnen comfortklachten ontstaan met betrekking tot geïrriteerde ogen, droge huid etc. Daarom is er voor gekozen om gedurende de meetsessie een mobiele luchtbevochtiger in de ruimte te plaatsen. Deze bevochtiger houdt de RV op een constant niveau van 40%; dit niveau wordt als comfortabel ervaren [ASHRAE, 2004].

7.2.4 Instrumentatie

De omgevingsparameters in de ruimte zijn gemeten aan de hand van ISO norm 7726 (1998). In het navolgende zullen kort de omgevingsparameters besproken worden die zijn gemeten. Voor de specificaties en kalibratiegegevens van de gebruikte meetapparatuur wordt verwezen naar Appendix 2.

Luchttemperatuur en relatieve luchtvochtigheid

De luchttemperatuur en de relatieve luchtvochtigheid zijn gemeten met behulp van gecombineerde sensoren. Voor het meten van de luchttemperatuur is gebruik gemaakt van NTC-thermistors (Negatieve Temperatuur Coëfficiënt weerstand) (NTC Thermistor, type SC95). Bij een NTC weerstand neemt de elektrische weerstand af als de temperatuur toeneemt. Met behulp van vergelijking 7.3 kan de temperatuur berekend worden aan de hand

van de gemeten weerstand (Steinhart-Hart functie), a, b en c zijn hierin richtingscoëfficiënten die aan de hand kalibratie bepaald kunnen worden.

Voor het meten van de relatieve luchtvochtigheid is gebruik gemaakt van een capacitieve hygrometer (Humidity Sensors, Honeywell HIH-4000 series). Aan de hand van de variatie in de elektrische capaciteit (geleiding) van de sensor wordt de relatieve luchtvochtigheid bepaald. De sensoren zijn zo geplaatst dat deze zich niet in het luchtstromingsveld van de luchtsnelheidsensoren bevinden.

$$\frac{1}{T} = a + b \cdot \ln R + c \cdot \ln R^3 \quad (7.3)$$

Stralingstemperatuur

Voor het meten van de gemiddelde stralingstemperatuur is gebruik gemaakt van zwarte bol sensoren. Deze sensoren bestaan uit een gesloten zwarte bol, in het midden van deze bol is een NTC-thermistor geplaatst. De diameter van de bol bedraagt 0,15m, deze diameter wordt ook aanbevolen door de ISO-norm 7726 (1998) voor het meten van de gemiddelde stralingstemperatuur. Hoe kleiner de diameter van de bol is, hoe groter het effect van de luchttemperatuur en de luchtsnelheid is op de gemiddelde stralingstemperatuur. De gemiddelde stralingstemperatuur die gemeten wordt met behulp van de stralingstemperatuur is slechts een benadering, omdat de mens een andere vorm heeft dan een bol. Indien er grote verschillen bestaan tussen de omgevingstemperatuur en de oppervlaktetemperaturen is het verstandig om de stralingstemperatuur te berekenen aan de hand van de oppervlaktetemperaturen [ISO 7726, 1998].

Oppervlakte temperatuur

De oppervlaktetemperaturen van de wanden, de vloer en het plafond zijn gemeten met behulp van PT-1000 sensoren. Voor dit type sensoren geldt eveneens dat de weerstand afhankelijk is van de temperatuur. Voor een platina weerstandssensor geldt dat de weerstand groter wordt bij een toenemende temperatuur.

Inblaastemperatuur

De inblaastemperatuur is eveneens gemeten met behulp van PT-1000 sensoren.

Luchtsnelheid

In het algemeen is het moeilijk om een accurate luchtsnelheidsmeting te verrichten in gebouwen; de luchtstroming is in de meeste gevallen turbulent, de fluctuaties in de luchtsnelheid zijn zeer wisselvallig en meestal verandert de luchtstroom ook regelmatig van richting. Vanwege deze complexiteit zijn de volgende eigenschappen van de luchtsnelheidsmeters van belang [ISO 7726, 1998]:

- De gevoeligheid voor de richting van de luchtstroom;
- De gevoeligheid voor de fluctuaties in de luchtsnelheid;

- De mogelijkheid om de gemiddelde luchtsnelheid en de standaarddeviatie te berekenen voor een bepaalde meetperiode.

De nauwkeurigheid van de gemiddelde snelheid hangt af van de kalibratie van het instrument. De nauwkeurigheid van de standaarddeviatie en de turbulentie-intensiteit hangt af van de responstijd.

Binnen dit onderzoek is er gebruik gemaakt van de lage snelheid hete bol anemometer (hot sphere anemometer, Dantec). Deze anemometer is ontwikkeld met als doel het gebruik in gebouwen [Loomans en Van Schijndel, 2002]. De sensor bestaat uit twee bolvormige sensoren, een verwarmde sensor en een onverwarmde, koude, sensor. Met behulp van de verwarmde sensor wordt de luchtsnelheid geregistreerd, dit wordt aan de hand van de mate van afkoeling van de verwarmde sensor bepaald. De onverwarmde sensor meet de luchttemperatuur. Er bestaan ook sensoren zonder een koude sensor, deze kunnen echter alleen toegepast worden bij de temperatuur waarbij ze gekalibreerd zijn.

Ten aanzien van de positionering van de sensoren is het van belang dat de luchttemperatuur en de luchtsnelheid voor beide sensoren gelijk zijn. Daarom dienen beide sensoren op dezelfde wijze in de luchtstroming worden geplaatst (de beste positionering is loodrecht).

Verlichtingssterkte

De verlichtingssterkte is gemeten met behulp van een verlichtingssterktemeter (Lux meter, Hanger model E2) en een lichtcel (standard external detector, Hagner for SD2). De gebruikte sensor is gefilterd voor de spectrale gevoeligheid van het menselijke oog in navolging van de CIE standaard. De verlichtingssterkte is gemeten ter controle tussen de meetsessies.

Eveneens is de kleurtemperatuur van de verlichting gemeten met behulp van een kleurtemperatuurmeter (Minolta). Deze bedroeg voor alle meet sessie 3460K.

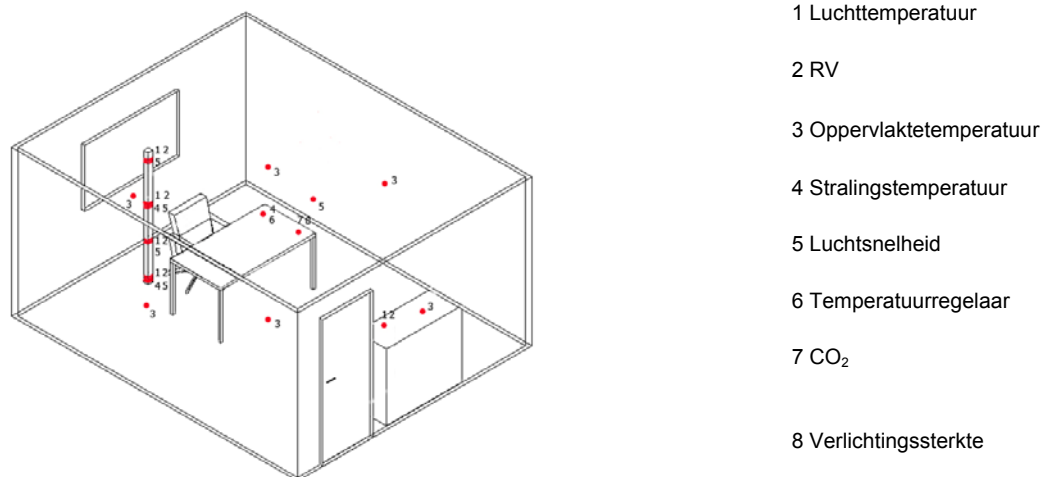
CO₂-gehalte

Het CO₂-gehalte is eveneens ter controle gemeten. Het CO₂-gehalte in de ruimte is gemeten met behulp van een CO₂-meter (Carbon Dioxide Transmitter, Vaisala 0-2000 ppm). De meter bevat een silicone CARBOCAP sensor.

7.2.4.1 Positionering omgevingsparameters

In figuur 7.4 is de positionering van de meetsensoren in de ruimte weergegeven. De hoogten op de meetpaal komen overeen met 0.1, 0.6, 1.1 en 1.7m, deze hoogten zijn bepaald conform ISO norm 7726 (1998). De oppervlaktetemperaturen van het plafond, de vloer en de wanden zijn gemeten in het midden van het desbetreffende oppervlak. De stralingstemperatuur is gemeten nabij de meetpaal op een hoogte van 0.1 en 1.1m, tevens is de stralingstemperatuur gemeten nabij de tafel. Het CO₂ gehalte en de verlichtingssterkte zijn gemeten op de hoek van de tafel. De temperatuur van de inblaaslucht is gemeten nabij de luchtbehandelingskast en 0,5m voor het inblaasrooster.

Tijdens de meetsessies zijn er ook infraroodopnamen gemaakt, om te bepalen of er sprake is van een stralingsasymmetrie. Ook kan aan de hand van deze opnamen de temperatuurverdeling over het lichaam worden gevisualiseerd.



Figuur 7.4: Overzicht van de positionering van de meetsensoren

7.3 Proefpersonen

Aan dit onderzoek hebben acht gezonde mannen, in de leeftijd van 20-30 jaar, deelgenomen. Alle proefpersonen hebben voorafgaande aan het onderzoek uitgebreide informatie ontvangen over het doel en de opzet van het onderzoek. Na het lezen van de informatie hebben zij een toestemmingsverklaring voor deelname aan het onderzoek getekend (Appendix 3).

7.3.1 Lichaamskenmerken

In het thermofysiologisch model dat gebruikt wordt binnen dit onderzoek kunnen individuele lichaamskenmerken opgegeven worden (zie paragraaf 4.4). De lichaamskenmerken die benodigd zijn voor de invoer van het model worden in het navolgende besproken.

7.3.1.1 Lichaamsoppervlakte

De totale lichaamsoppervlakte (A_D) kan geschat worden met behulp van de vereenvoudigde formule van Dubois en Dubois. Hierin wordt de totale oppervlakte van het lichaam geschat aan de hand van de lengte (H) en het lichaamsgewicht (W) van een persoon [Parsons, 2003]. De vergelijking voor het schatten van de totale lichaamsoppervlakte is weergegeven in vergelijking 7.4.

$$A_D = 0,202 \cdot W^{0,425} \cdot H^{0,725} \quad (7.4)$$

7.3.1.2 Vetpercentage

Het vetpercentage kan gebruikt worden als maat voor de dichtheid van het lichaam. Om een indruk te krijgen van het vetpercentage van de proefpersonen wordt gebruik gemaakt van de huidplooimethode. Bij deze methode worden de huidplooien gemeten op vier verschillende plaatsen: onder het schouderblad (subscapulair), bij de triceps, bij de biceps en bij de buik (suprailiacaal). De metingen zijn verricht aan de rechterzijde van het lichaam, hierbij zijn de richtlijnen aangehouden zoals die gegeven worden door Lohman et al. (1988).

Als de dikte van de huidplooien bekend is dan kan aan de hand van de Siri (1961) vergelijking het vetpercentage bepaald worden [Durnin en Rahaman, 1967]. Deze vergelijking ziet er als volgt uit:

$$\text{vet}\% = \left(\frac{4,95}{\rho} - 4,5 \right) \cdot 100\% \quad (7.5)$$

De lichaamsdichtheid kan bepaald worden aan de hand van de methode van Durnin en Womersley (1974), deze is weergegeven in vergelijking 7.6. Voor het bepalen van de lichaamsdichtheid wordt er een onderscheid gemaakt in het geslacht en de leeftijd.

$$\rho_m = C - (M(\log_{10} \sum \text{huidplooien})) \quad (7.6)$$

De variabelen C en M (richtingscoëfficiënten die vastgesteld zijn aan de hand van regressievergelijkingen) die ingevuld dienen te worden zijn voor mannen weergegeven in tabel 7.1.

Tabel 7.1: De C en M voor mannen

Leeftijd	17-19	20-29	30-39	40-49	50+
C	1,1620	1,1631	1,1422	1,1620	1,1715
M	0,0630	0,0632	0,0544	0,0700	0,0779

Een andere methode, om een indruk te krijgen van het vetpercentage, is het bepalen van de Body Mass Index (BMI). Deze methode gaat uit van het gewicht en de lichaamslengte. De vergelijking voor het bepalen van de BMI is als volgt:

$$BMI = \frac{W}{H^2} \quad (7.7)$$

Vervolgens kan aan de hand van de BMI het vetpercentage berekend worden met behulp van vergelijking 7.8, hierin wordt voor het geslacht voor mannen de waarde 1 aangehouden, en voor vrouwen de waarde 0 [Deurenberg et al, 1991].

Een nadeel van de BMI methode is dat alle massa's samenvoegd worden tot één massa, en er geen onderscheid gemaakt wordt in vet en spieren. Voor een gezond lichaamsgewicht dient de BMI tussen de 18,5 en 25 te liggen [Voedingscentrum, 2007]. Echter indien een persoon heel gespierd is kan de BMI hoog uitvallen, waardoor dit een vertekend beeld geeft.

$$\text{vet\%} = 1,20 \cdot \text{BMI} + 0,23 \cdot \text{leeftijd} - 10,8 \cdot \text{geslacht} - 5,4 \quad (7.8)$$

7.3.1.3 Vetverdeling

De verdeling van het vet over het lichaam is niet voor alle personen gelijk. Vaak wordt een onderscheid gemaakt tussen 'peervormige' en 'appelvormige' personen. Bij peervormige personen bevindt het vet zich voornamelijk op de heupen en dijbenen. Bij appelvormige personen is het meeste vet voornamelijk aanwezig rond de buik. Aan de hand van de verhouding tussen de tailleomtrek en de heupomtrek (waist-to-hip ratio) en de omtrek van de taille kan bepaald worden of een persoon peervormig of appelvormig is. Een overzicht van de criteria voor het bepalen van peervormige of appelvormige personen is weergegeven in tabel 7.2.

Tabel 7.2: Criteria voor het bepalen van peervormige of appelvormige mannen [Lean et al., 1995]

	Peervormig	Appelvormig
Waist-to-hip ratio	$\leq 0,95$	$> 0,95$
Tailleomtrek [cm]	≤ 94	> 94

7.3.1.5 Kleding proefpersonen

Gedurende de meetsessies hebben de proefpersonen standaard kleding gedragen. Hierdoor kunnen eventuele verschillen in fysiologische responses en sensaties niet te wijten zijn aan de gedragen kleding. De standaardkleding bestond uit een katoenen vest (100% katoen) en katoenen joggingbroek (100% katoen). De personen droegen hun eigen ondergoed, sokken en schoenen die de enkels niet bedekten. De thermische en hygrische eigenschappen van de kleding zijn bepaald aan de hand van ISO-norm 9920 (1995) en uit de database die McCullough et al. (1989 en 2004) ontwikkelde, deze zijn weergegeven in tabel 7.3. Uit eerder onderzoek bleek eveneens dat de bureaustoel ook een significante invloed heeft op de thermische weerstand. De thermische weerstand van een bureaustoel bedraagt ongeveer 0,15 clo [De Dear et al., 1998]. De totale isolatieweerstand van de kleding inclusief bureaustoel bedraagt bij benadering 0.98 clo.

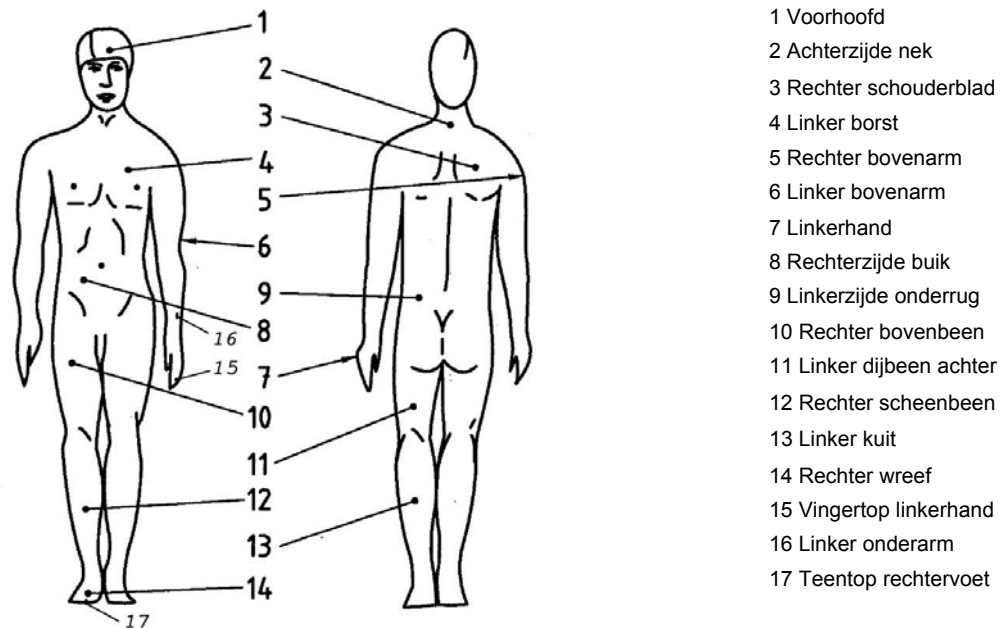
Tabel 7.3: Thermische en hygrische eigenschappen van de kleding

	I_{cl}		f_{cl}	$R_{e,f}$	i_f
	[clo]	[m ² °C/W]	[-]	[m ² 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	0,416
Sokken	0,02	0,003	1,01	0,0076	0,553
Schoenen	0,05	0,008	1,03	0,0790	0,050
Bureaustoel	0,15	-	-	-	

7.3.2 Instrumentatie

De huidtemperaturen en de kerntemperatuur zijn gemeten aan de hand van ISO 9886 (2004). De huidtemperatuur is gemeten op 17 posities; de 14 posities die door de norm worden voorgeschreven aangevuld met de linkeronderarm, de linkerwijsvinger en de top van de rechter middelteen (zie figuur 7.5). Deze laatste posities zijn toegevoegd om vast te kunnen stellen wat de huidtemperatuur is van de extremiteiten en het bepalen van eventuele vasomotie. De mate van vasomotie kan bepaald worden aan de hand van het temperatuurverschil tussen de onderarm en de vingertop, en het temperatuurverschil tussen het scheenbeen en de teentop. De kerntemperatuur is gemeten met behulp van een rectale sensor.

Voor het meten van de huidtemperaturen verdiende het de voorkeur om de metingen te verrichten met behulp van draadloze sensoren. Op deze manier was het voor de proefpersonen mogelijk om hun lichaamsdelen vrij te bewegen. Voor het meten van de huidtemperaturen is er gebruik gemaakt van iButton's. De iButton is een ronde (ø16mm, d=6mm) sensor, met ingebouwde datalog functionaliteit die de huidtemperaturen meet en de resultaten ervan opslaat in een beschermd geheugendeel. In een onderzoek naar de nauwkeurigheid en toepassing van deze sensoren bleek dat de iButton een geschikt alternatief is voor de traditionele thermistors en thermokoppels [van Marken Lichtenbelt et al., 2006]. De rectale temperatuur is gemeten met behulp van een thermistor. Een overzicht van de specificaties van de benodigde meetapparatuur en de gebruikte meetapparatuur voor het meten van de fysiologische parameters is opgenomen in Appendix 2



Figuur 7.5: Overzicht meetposities huidtemperaturen

7.4 Vragenlijsten

Het gebruik van vragenlijsten is een veel gebruikte en toegepaste methode om inzicht te krijgen in de thermische voorkeuren van mensen. Eveneens kan hierdoor bepaald worden of een persoon zich comfortabel of oncomfortabel voelt in een bepaalde omgeving. Echter de responses die personen geven kunnen beïnvloed worden door de gemoedstoestand (vermoeidheid, stress etc.). Ook ervaringen uit het verleden kunnen een rol spelen. Als een persoon bijvoorbeeld al een keer in een bepaalde situatie heeft verkeerd en deze situatie als oncomfortabel heeft beoordeeld, dan kan deze persoon een volgende keer deze belevenis mee laten spelen. Ook kunnen antwoorden niet valide zijn, dat wil zeggen dat de gegeven antwoorden niet overeenkomen met de werkelijkheid. Om ervoor te zorgen dat de responses zo betrouwbaar mogelijk zijn, dienen de vragenlijsten aan de volgende eisen te voldoen (Baarda et al., 2000):

- De anonimiteit dient gewaarborgd te worden;
- De hoeveelheid vragen dient beperkt te zijn;
- De vragen dienen duidelijk en ondubbelzinnig geformuleerd te worden;
- Termen dienen goed gedefinieerd te zijn;
- Zoveel mogelijk concrete vragen stellen;
- Vragen met een ontkenning dienen te worden vermeden;
- Suggestieve vragen dienen vermeden te worden;
- De vragen dienen neutraal geformuleerd te zijn.

Voor de vragenlijsten is gebruik gemaakt van een internetapplicatie die ontwikkeld is aan het International Centre for Indoor Environment and Energy van de Technische Universiteit van Denemarken. Iedere proefpersoon heeft de mogelijkheid om de vragenlijsten op zijn eigen laptop te beantwoorden, en krijgt voorafgaande aan het experiment een persoonlijke inlogcode. Elke vragenlijst start met een korte introductie over het doel van het onderzoek. Ook staat hierin beschreven hoe de verschillende onderdelen beantwoord dienen te worden. Als alle onderdelen van de vragenlijst beantwoord zijn, dan worden de antwoorden opgestuurd naar een server. Deze server slaat de antwoorden op in een database die na afloop van het experiment gedownload kan worden. De internetapplicatie is te bereiken via <http://www.ie.dtu.dk/tue> (de vragenlijsten zijn eveneens opgenomen in Appendix 4). In totaal bestaat een vragenlijst uit zeventien comfortvragenlijsten en zeventien prestatietaken. Elke comfortvragenlijst is identiek, de prestatietaken wisselen elkaar af. De vragenlijsten en prestatietaken worden elke 30 minuten gedurende het experiment afgenomen. Door de vragenlijsten met dit interval af te nemen kan er beoordeeld worden wat de effecten zijn van een temperatuurstijging van 1°C. In totaal neemt het beantwoorden van een comfortvragenlijst en het maken een prestatietaak ongeveer 10 minuten in beslag. In het navolgende worden de delen van de vragenlijsten apart besproken.

7.4.1 Algemeen thermisch comfort

Het eerste deel van de vragenlijst informeert naar de beoordeling van de thermische omgeving. Eveneens worden in dit gedeelte enkele vragen gesteld over het algemeen welbevinden en de aanwezigheid van eventuele SBS symptomen.

Ook is er een vraag opgenomen in welke mate een proefpersoon stress ervaart, er is namelijk gebleken dat het ervaren van stress een grote invloed kan hebben op de betrouwbaarheid van de antwoorden [Cleemments-Croome, 2006].

De vragen die gesteld worden zijn ontleend aan de vragen uit de ISO-norm 10551 (1995) en de ASHRAE standaard 55 (2004). De schaal die gebruikt wordt voor het aangeven van de thermische sensatie is ontleend aan de ISO-norm 7730; de 7-puntscomfortschaal (zie paragraaf 2.1).

Voor het beoordelen van de thermische sensatie en de beleving van de ruimte is gebruik gemaakt van een 'visual – Analogue Scale' (VAS). Dit is een schaal die gepresenteerd wordt als een horizontale lijn, waarbij op elke gewenste positie het antwoord kan worden gemarkeerd [Kildesø et al., 1999]. Door gebruik te maken van een dergelijke schaal wordt de proefpersoon niet gedwongen om in een bepaalde richting een antwoord te geven. De schaal voor de thermische sensatie is op 7 posities gemarkeerd, de overeenkomstige sensaties staan onderaan de markeringen beschreven (zie figuur 7.6).

Voor alle vragen gold dat het niet mogelijk was voor de proefpersoon om vragen onbeantwoord te laten. Indien de proefpersoon een vraag niet heeft beantwoord verschijnt er een scherm waarin wordt aangegeven welke vraag of vragen niet ingevuld zijn.

1. Hoe voel je je op dit moment?



Figuur 7.6: Schaalverdeling voor het beoordelen van de thermische sensatie

7.4.2 Prestatie en productiviteit

Voor het beoordelen van de prestatie en de productiviteit van proefpersonen is gebruik gemaakt van de 'Remote Performance Measurement' (RPM) methode. Deze methode is eveneens ontwikkeld aan het International Centre for Indoor Environment and Energy [Toftum et al., 2005].

Zoals aangegeven is in paragraaf 6.3 mag er aangenomen worden dat als activiteiten zoals het typen van stukken tekst en het maken van sommen beïnvloed worden door veranderingen in de temperatuur, dat dan ook de resultaten van kantoortaken in het algemeen beïnvloed worden door veranderingen in de temperatuur. Voor dit experiment wordt er gebruik gemaakt van twee verschillende type taken. De eerste taak bestaat uit het optellen van getallen, de tweede taak omvat het overtypen van een stuk tekst. Beiden taken zullen in het navolgende besproken worden.

Rekentaak

Tijdens de rekentaak wordt de proefpersoon gevraagd om een kolom getallen bij elkaar op te tellen. Deze kolom getallen bestaat uit drie verschillende getallen, elk getal omvat twee cijfers. De getallen worden random gegenereerd en bevatten geen nullen. Als de proefpersoon de comfortvragenlijst heeft beantwoord en de resultaten heeft verzonden, dan verschijnt er automatisch een kader op het scherm waarin de getallen zijn weergegeven. Het antwoord van de rekensom kan de proefpersoon invullen in een leeg kader onderaan de kolom getallen (zie figuur 7.7).

Nadat de internetbrowser klaar is met het inladen van de pagina wordt een timer gestart; deze timer is ingesteld op tien minuten. Gedurende deze tien minuten wordt er elke keer een nieuwe pagina met sommen ingeladen als de proefpersoon alle sommen heeft gemaakt. Wanneer de tijd verstreken is, dan verschijnt er een beeld op het scherm dat de tijd voorbij is. De proefpersoon kan stoppen met de vragenlijst tot er weer een nieuw bericht op het scherm verschijnt met de melding dat er een nieuwe vragenlijst ingevuld dient te worden.

De prestatie wordt vastgesteld aan de hand van het percentage correcte sommen die de proefpersoon heeft gemaakt. De productiviteit wordt aan de hand van het aantal gemaakte

sommen beoordeeld. Het is de bedoeling dat de proefpersoon de sommen maakt zonder gebruik te maken van een rekenmachine.

Opteltaak

229 + 329 _____	241 + 186 _____	157 + 171 _____	783 + 119 _____	336 + 157 _____
688 + 266 _____	898 + 471 _____	587 + 523 _____	434 + 292 _____	799 + 334 _____

Volgende

Figuur 7.7: Voorbeeld van een rekentaak

Teksttaak

Tijdens de teksttaak wordt de proefpersoon gevraagd om een stuk tekst (ongeveer tien regels) exact hetzelfde over te typen, zoals deze op het scherm verschijnt. De teksten die de proefpersonen dienen over te typen zijn gekozen uit verschillende tijdschriften en rapporten.

Om te voorkomen dat de proefpersonen de teksten simpelweg 'knippen en plakken', verschijnen de teksten als een afbeelding (zie figuur 7.8). De timerfunctie is gelijk aan de timerfunctie bij de rekentaak. Telkens als de proefpersoon klaar is met het overtypen van een stuk tekst, verschijnt er een nieuwe tekst totdat de tijd verstreken is. Een overzicht van de teksten die aangeboden zijn, is opgenomen in Appendix 5.

De prestatie en productiviteit worden vastgesteld aan de hand van verschillende parameters; het aantal getypte karakters per minuut, en de berekende foutenmarge. De foutenmarge wordt vastgesteld aan de hand van de Levenshteinafstand (bewerkingsafstand). Dit is een maat voor de minimale hoeveelheid bewerkingen die nodig is om een tekenreeks (woord) te veranderen in een andere tekenreeks. De teksten die getypt zijn worden na afloop met de originele tekst vergeleken, en vervolgens wordt aan de hand van deze vergelijking de Levenshteinafstand bepaald. De Levenshteinafstand wordt bepaald aan de hand van de bewerkingen deletie (teken verwijderen), insertie (teken invoegen) en alteratie (teken veranderen in een ander teken) [Toftum et al., 2005].

Teksttaak

Vulkanisme aan de randen van continenten is het gevolg van het onderschuiven van de ene plaat onder de andere, zoals bij de Andes. Dat wordt subductie genoemd. De ondergeschoven plaat wordt zo diep in de aardmantel weggeduwd dat hij gaat smelten, waardoor magma ontstaat. Dat magma is lichter dan de omringende gesteenten en daarom stijgt het op, tot het het oppervlak bereikt. Dan krijg je vulkanen. Ook bij eilandbogen als de Bovenwindse Eilanden van de Nederlandse Antillen gebeurt dit. In al deze gevallen bewegen de platen naar elkaar toe. Maar het vulkanisme in Midden-Afrika, zoals bij de recente eruptie van de Nyiragongo die Goma verwoestte, is juist het gevolg van het feit dat daar platen uiteenwijken. Dwars door Afrika loopt de Oost-Afrikaanse slenk, een enorme breukzone waarlangs Oost-Afrika langzaam van de rest wil afdrijven. Bij het opengaan van die breuken welt basaltisch magma diep uit de aardmantel omhoog, als bloed uit een wond. Dit is hetzelfde vulkanisme dat we aantreffen op IJsland en op de Azoren.



Volgende

Figuur 7.8: Voorbeeld van een teksttaak

7.4.3 Controle meetsessie

Om te beoordelen of eventuele veranderingen in de productiviteit of prestatie te wijten zijn aan veranderingen in de temperatuur, worden de metingen ook verricht gedurende een zogenaamde controle meetsessie. Hierdoor is het mogelijk om te controleren wat het effect van de tijd is op de productiviteit en prestatie. Aan de hand hiervan kan er vastgesteld worden of eventuele verbeteringen of verslechteringen in de prestatie en productiviteit gerelateerd kunnen worden aan de omgevingstemperatuur. Gedurende de controle meetsessie ondergaat de proefpersoon hetzelfde protocol als bij de test meetsessie, echter de luchttemperatuur wordt tijdens deze sessie constant gehouden (21,5°C, PMV=0). De volgorde van de experimenten wordt beurtelings omgewisseld, proefpersoon 1 begint met de controle meetsessie en eindigt met de test meetsessie en proefpersoon 2 begint met de test meetsessie en eindigt met de controle meetsessie etc. Het beste zou zijn om deze volgorde te randomiseren, maar hiermee ontstaat het gevaar dat er bijvoorbeeld zes proefpersonen starten met de controle meetsessie.

7.5 Statistische methoden

Om de resultaten van proefpersonen en meetsessies onderling met elkaar te kunnen vergelijken en uitspraken te doen over de significantie van de verschillende en de gevonden relaties is het van belang dat er een statistische analyse verricht wordt. Daarnaast wordt er ook een statistische analyse verricht voor het beoordelen van en relaties tussen de verschillende parameters.

7.5.1 Significantie verschillen toetsen

Doordat elke proefpersoon deelgenomen heeft aan zowel de experimentele meetsessie als aan een controle meetsessie (zie paragraaf 7.4) is het mogelijk om de eventueel optredende verschillen tussen beiden meetsessies te toetsen aan de hand van een gepaarde t-toets (beide waarnemingen worden hierbij als gepaard beschouwd). Daarnaast kunnen ook de resultaten van het eerste en tweede gedeelte (respectievelijk opwaarts en neerwaarts temperatuurverloop) van de experimentele meetsessie met elkaar vergeleken worden met behulp van een gepaarde t-toets.

Met behulp van de gepaarde t-toets wordt er bepaald of de gemiddelde waarde van het verschil tussen twee gepaarde datasets significant afwijkt van nul. Voor de gepaarde t-toets worden er twee hypothesen geformuleerd: de nulhypothese (vergelijking 7.9) en de alternatieve hypothese (vergelijking 7.10) [Buijs, 2003; Montgomery et al., 2004].

$$H_0 \text{ (er is gemiddeld geen verschil): } \mu_d = 0 \quad (7.9)$$

$$H_1 \text{ (er is gemiddeld wel een verschil): } \mu_d \neq 0: \mu_d > 0 \text{ of } \mu_d < 0 \quad (7.10)$$

Indien de kans kleiner is dan 5% ($p < 0,05$) dat het gemiddelde verschil tussen de twee datasets (μ_d) gelijk is aan nul, dan wordt het verschil als statistisch significant beschouwd en wordt de nulhypothese (H_0) verworpen.

7.5.2 Relaties tussen verschillende parameters vastleggen en toetsen

7.5.2.1 Regressiemodellen

Met behulp van regressiemodellen is het mogelijk om te bepalen of er een verband bestaat tussen verschillende (gemeten) parameters. Binnen een regressiemodel wordt er bekeken of de ene parameter afhankelijk (afhankelijke variabele) is van de andere parameter (onafhankelijke variabele). Hierbij wordt de afhankelijke variabele beschouwd als het gevolg

van de onafhankelijke variabele; dit wordt ook wel een causaal verband genoemd. Wanneer er een lineair verband bestaat tussen twee variabelen kan dit met behulp van een lineair regressiemodel worden beschreven. Een dergelijk model is weergegeven in vergelijking 7.11. De regressiecoëfficiënt β geeft de verandering van Y aan als de variabele x met één eenheid verandert. De regressiecoëfficiënt α geeft de waarde van Y aan indien x gelijk is aan nul; deze coëfficiënt wordt ook wel intercept genoemd [Buijs, 2003; Montgomery, 2004].

$$Y = \alpha + \beta \cdot x \quad (7.11)$$

Echter, behalve de invloed van de variabele x is er ook nog een toevalsfactor van invloed op de variabele Y ; deze factor wordt aangeduid met ε oftewel de storingsterm. De storingsterm geeft de invloed aan van andere factoren, zoals toevalsfactoren en onvolledigheden in het gekozen model, op de variabele Y . Deze storingsterm wordt meestal bepaald aan de hand van de kleinste kwadratenmethode. Hierbij worden de coëfficiënten α en β zodanig gekozen dat de som van de kwadraten van alle afwijkingen van het meetpunt ten opzichte van de lijn minimaal is. In vergelijking 7.12 is het lineaire regressiemodel weergegeven, inclusief storingsterm.

$$Y = \alpha + \beta \cdot x + \varepsilon \quad (7.12)$$

Naast een lineair model bestaan er ook meerdere graadsmodellen, zoals het tweedegraadsmodel (kwadratisch model). De regressiecoëfficiënten in het kwadratisch model worden eveneens bepaald aan de hand van de kleinste kwadratenmethode. Het kwadratisch model ziet er als volgt uit:

$$Y = \alpha + \beta \cdot x + \gamma \cdot x^2 + \varepsilon \quad (7.13)$$

7.5.2.2 Toetsen significantie regressiecoëfficiënten

Bij het opstellen van een regressiemodel is het belangrijk om te onderzoeken of de waarden voor de regressiecoëfficiënten significant zijn. Indien een regressiecoëfficiënt niet significant bevonden wordt, dan draagt deze nauwelijks bij aan het model en kan deze worden weggelaten. Door te toetsen of de waarden van de regressiecoëfficiënten significant afwijken van nul kan bepaald worden of deze significant zijn. Als nulhypothese wordt aangehouden dat de regressiecoëfficiënt gelijk is aan nul. Indien de kans kleiner is dan 5% ($p < 0,05$) dat deze gelijk is aan nul dan wordt de nulhypothese verworpen.

7.5.2.3 Correlatiecoëfficiënt

Nadat het regressiemodel is opgesteld dient er bepaald te worden of het gevonden verband ook daadwerkelijk een relatie vertoont tussen de variabelen Y en x. Dit kan bepaald worden met behulp van de correlatiecoëfficiënt (r); deze geeft de sterkte van de gevonden relatie weer. De correlatiecoëfficiënt heeft altijd een waarde tussen -1 en 1, waarbij -1 en 1 een perfecte relatie aangeven. Naarmate de correlatiecoëfficiënt dichter bij nul ligt neemt de sterkte van de relatie af, bij nul is er sprake van geen relatie. Het kwadraat van de correlatiecoëfficiënt (r^2) geeft het percentage van de variantie aan, dat door het regressiemodel verklaard wordt.

7.5.2.4 Meervoudige regressie

Indien het vermoeden bestaat dat de variabele Y door meer variabelen beïnvloed wordt dan alleen de variabele x, dan kan met behulp van meervoudige regressie het verband worden bepaald tussen deze variabelen en Y. Indien er sprake is van twee verklarende variabelen (x en z) dan ziet het lineaire regressiemodel er als volgt uit:

$$Y = \alpha + \beta_1 \cdot x + \beta_2 \cdot z + \varepsilon \quad (7.14)$$

De regressiecoëfficiënten binnen het meervoudige regressiemodel worden eveneens bepaald aan de hand van de kleinste kwadratenmethode. De determinatiecoëfficiënt (R^2) geeft het percentage van de variantie aan dat met behulp van het meervoudige regressiemodel kan worden verklaard. De determinatiecoëfficiënt heeft altijd een waarde tussen 0 en 1, waarbij geldt hoe hoger de waarde hoe sterker de relatie. Daarnaast bestaat er ook de aangepaste determinatiecoëfficiënt (R^2_{adj}); hierbij wordt er voor het aantal onafhankelijk variabelen en de grootte van de dataset gecorrigeerd.

7.5.2.5 Dummy variabelen

Bij het opstellen van meervoudige regressiemodellen kan er gebruik gemaakt worden van dummyvariabelen. Deze hebben als kenmerk dat ze alleen de waarde 0 en 1 kunnen aannemen. Een dummyvariabele (D) kan worden gebruikt om aan te geven of er bij de waargenomen parameters een bepaald kenmerk wel of niet aanwezig is (respectievelijk $D=1$ of $D=0$). In de regressievergelijking krijgt D de waarde d. Na het opstellen van het regressiemodel geeft d de invloed aan van het aanwezig zijn van het genoemde kenmerk [Buijs, 2003]. Binnen dit onderzoek worden dummyvariabelen gebruikt om aan te geven of de

proefpersoon of het type temperatuurverloop (opwaarts of neerwaarts) van invloed zijn op de behaalde resultaten.

7.6 Meetprotocol

Om de verschillen tussen de meetsessies zo klein mogelijk te houden, zijn de meetsessies uitgevoerd aan de hand van een meetprotocol (zie Appendix 6). Voorafgaande aan de meet sessie hebben de proefpersonen een lichte bewegingsoefening uitgevoerd. Deze bewegingsoefening bestond uit het, in een rustig tempo, op- en afstappen van een verhoging (hoogte van deze verhoging bedroeg 15cm). Deze exercitie werd minimaal 5 minuten verricht en de proefpersoon mocht na deze 5 minuten stoppen als er vasodilatatie (zie hoofdstuk 3) was opgetreden, indien dit niet het geval was dan werd de oefening voortgezet totdat deze conditie wel bereikt was. Als er vasodilatatie was opgetreden dan kon er aangenomen worden dat de proefpersoon in een thermoneutrale situatie verkeerde. Na het aanbrengen van de rectale sensor werden de proefpersonen naar de onderzoeksruimte gebracht, waar de huidtemperatuursensoren aangebracht werden. Tijdens het aanbrengen van de sensoren kon de proefpersoon acclimatiseren aan het klimaat in de ruimte; deze acclimatisatieperiode duurde minimaal 30 minuten. Voordat de proefpersoon startte met het invullen van de eerste vragenlijst, kreeg hij een korte instructie en diende hij een proefvragenlijst te maken. De resultaten van deze proefvragenlijst zijn niet meegenomen in de analyse. Tijdens de meet sessie diende de proefpersoon na het invullen van elke vragenlijst een korte bewegingsoefening te verrichten. Deze oefening werd verricht ter stimulering van de doorbloeding naar de benen en voeten (deze oefeningen zijn ontleend aan de luchtvaart, zie Appendix 7).

Na het eerste deel van de meetsessie ontving de proefpersoon een lichte lunch⁴, deze lunch was voor elke proefpersoon gelijk. Gedurende de overige delen van de meetsessie was het alleen toegestaan om water te drinken en biscuitjes te nuttigen. Tijdens een meetsessie waren er twee pauzes van tien minuten. Deze pauzes vonden plaats als de ruimtetemperatuur in de onderzoeksruimte gelijk was aan de temperatuur in het laboratorium, zodat de proefpersoon geen temperatuurverschil ervoer bij het in- en uitgaan van de onderzoeksruimte.

⁴ De lunch bestond uit een wit bolletje met jonge kaas, een wit bolletje met achterham, een appel en een bekertje thee zonder suiker.

8. Meetresultaten

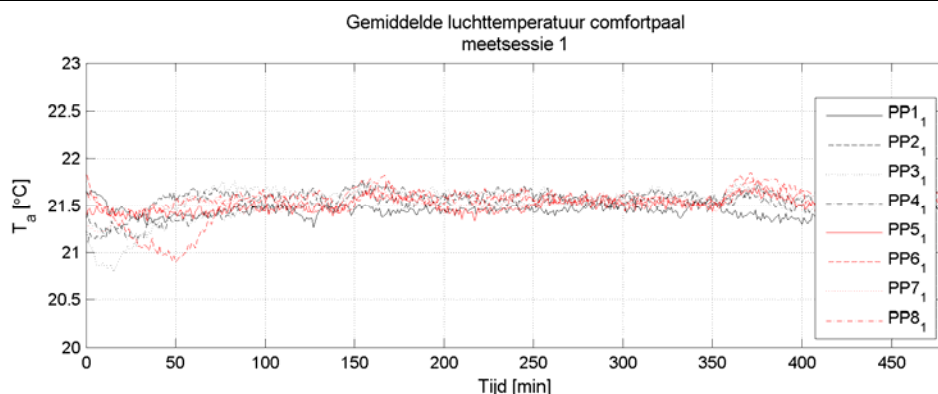
In dit hoofdstuk zullen de resultaten besproken worden die verkregen zijn aan de hand van de verrichte metingen. Allereerst zullen de verschillende meetsessies en de gemeten omgevingsparameters behandeld worden. Vervolgens komen de fysische kenmerken van de proefpersonen, die hebben deelgenomen aan het onderzoek, aan bod. Tot slot wordt er bepaald of er een relatie bestaat tussen de gemeten parameters en de responses van de vragenlijsten.

8.1 Omgevingsparameters

Zoals eerder al genoemd, is het van belang om de condities voor elke proefpersoon zo gelijk mogelijk te houden. In het navolgende zullen de resultaten besproken die verkregen zijn aan de hand van de metingen van de omgevingsparameters in de onderzoeksruimte. Voor zowel de experimentele meetsessie (verder genoemd als meetsessie 2) als voor de controle meetsessie (meetsessie 1) was het van belang dat de condities bij de verschillende proefpersonen zo gelijk mogelijk waren. In het navolgende zullen de verschillende omgevingsparameters en meetsessies apart besproken worden.

8.1.1 Meetsessie 1

De luchttemperatuur is de belangrijkste parameter waarop geregeld dient te worden binnen dit onderzoek. Zoals in paragraaf 7.4.3 werd besproken is de luchttemperatuur, die gerealiseerd diende te worden, bepaald aan de hand van de PMV. Gedurende meetsessie 1 werd er gestreefd naar een PMV van 0 (hetgeen overeenkomt met een neutrale sensatie), bij een thermische kleding weerstand van 0.98 clo. Om deze PMV te bewerkstelligen werd de luchttemperatuur tijdens meetsessie 1 ingesteld op 21,5°C. De resultaten van de gerealiseerde luchttemperatuur zijn weergegeven in figuur 8.1. De luchttemperatuur (T_a) die hier is weergegeven, is de gemiddelde luchttemperatuur, berekend aan de hand van de 4 hoogten van het comfortstatief. De afwijking die aan het begin van de meetsessie optreedt bij proefpersoon 3 en 6 is te wijten aan het inschakelmoment en de tijd die benodigd is voor het regelen van de klimaatinstallatie. Voor het verloop van de meetsessie kan gesteld worden dat de luchttemperatuur voor elke proefpersoon niet significant afwijkt van de andere proefpersonen.



Figuur 8.1: Verloop gemiddelde luchttemperatuur nabij comfortstatief meetsessie 1

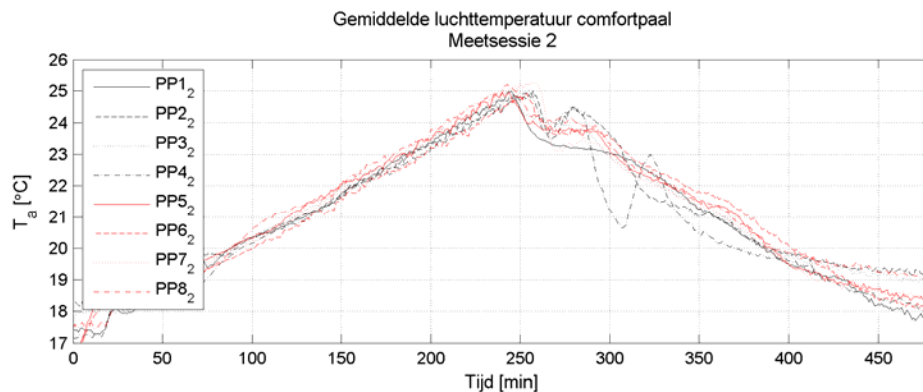
Een overzicht van de overige resultaten van de omgevingsparameters, die gemeten zijn tijdens meetsessie 1, is opgenomen in Appendix 8.

Uit deze resultaten blijkt dat de gemiddelde oppervlaktetemperaturen (figuur A.3) nagenoeg gelijk zijn aan de gemiddelde ruimtetemperatuur. Hierdoor is het niet noodzakelijk om de stralingstemperatuur te berekenen aan de hand van de oppervlaktetemperaturen. De CO₂-concentraties zijn nagenoeg constant gedurende de meetsessies en bedragen ongeveer 500 ppm; hiermee blijven ze ruim beneden de gezondheidsgrens (1200 ppm). De dippen in de CO₂ concentraties treden op tijdens het moment waarop de proefpersoon pauze heeft en de ruimte mag verlaten. Het verloop in de verlichtingssterkte is niet te verklaren, maar waarschijnlijk komt dit voort uit een meetfout. Aan de hand van de enquêteresultaten kan geconcludeerd worden dat de proefpersonen geen verschil hebben gemerkt in de mate van verlichting (zie figuur A.8).

8.1.2 Meetsessie 2

De gemiddelde luchttemperatuur, per proefpersoon, die gerealiseerd is gedurende meetsessie 2 is weergegeven in figuur 8.2. Hieruit blijkt dat er tijdens het tweede gedeelte van de meetsessie met proefpersoon 4 een afwijkend patroon in de luchttemperatuur is opgetreden. Dit verschil is significant ($p < 0,05$) ten opzichte van het patroon van het gemiddelde. Eveneens is te zien dat gedurende het tweede gedeelte van de meetsessie de spreiding in de luchttemperatuur groter is voor de verschillende proefpersonen (tabel A.9 t/m A.12). Ook wordt aan het einde van deze meetsessie het gewenste verloop in de temperatuur niet gehaald. Dit is te wijten aan de capaciteit van de koelmachine; tijdens het tweede deel van de meetsessie is er een afname te zien, die een logaritmische functie benadert. De temperaturen, die gerealiseerd werden tijdens de momenten waarop de vragenlijsten ingevuld dienden te worden, komen wel voldoende overeen met het gewenste

temperatuurverloop. Bij aanvang van meetsessie 2 is eveneens een inslingermoment aanwezig.

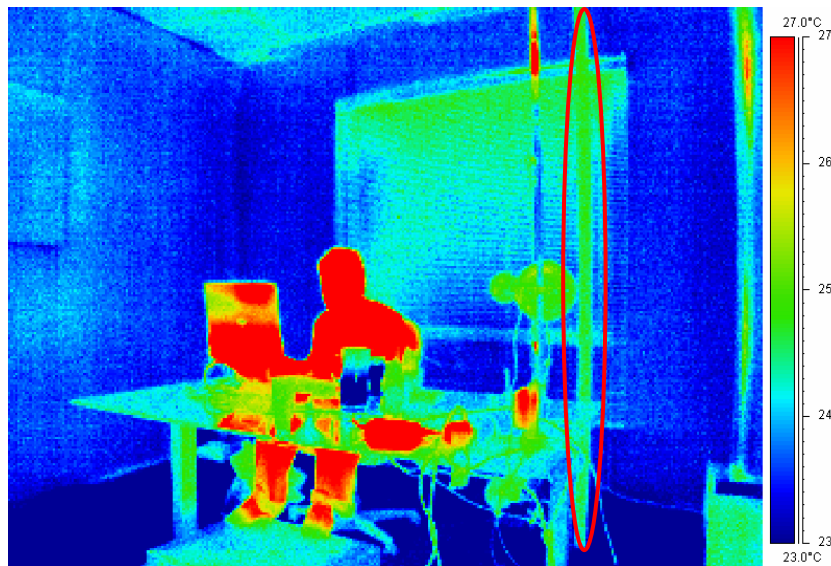


Figuur 8.2: Verloop gemiddelde luchttemperatuur nabij comfortstatief meetsessie 2

Voorafgaand aan het experiment werd verwacht dat er een verticale temperatuurgradiënt in de ruimte zou kunnen ontstaan ten gevolge van de hoge temperatuur van de inblaasluft die benodigd was voor het realiseren van het temperatuurverloop. Om dit te controleren zijn er gedurende de meetsessie elke tien minuten infraroodopnamen gemaakt van de proefpersoon en zijn omgeving. Om te kunnen controleren of er sprake was van een temperatuurgradiënt werd er een dun papieren lint in de ruimte aangebracht met een lage warmtecapaciteit, waardoor dit lint de temperatuur van de lucht volgde. Met behulp van de infraroodopnamen kon de oppervlaktetemperatuur van dit lint in kaart worden gebracht. Aan de hand van de opnamen kan nu ook visueel geconstateerd worden dat er geen verticale temperatuurgradiënt in de ruimte aanwezig was. In figuur 8.3 en 8.4 is een dergelijke opname weergegeven; deze opname is gemaakt op het moment dat de temperatuur van de inblaasluft het hoogst was. In figuur 8.4 is de schaal verkleind, zodat tot op fracties van graden nauwkeurig de temperatuurverdeling op het lint zichtbaar is.



Figuur 8.3: Visualisatie verticale temperatuurverdeling tijdens meetsessie 2 ($t=240$); schaal 22-37°C



Figuur 8.4: Visualisatie verticale temperatuurverdeling tijdens meetsessie 2 ($t=240$); schaal 23-27°C

Aan de hand van de infraroodopnamen en de meetresultaten van de gemiddelde stralingstemperaturen blijkt dat er geen grote verschillen bestaan tussen de luchttemperatuur en de oppervlaktetemperaturen ($<1^{\circ}\text{C}$). Conform de ISO norm 7726 (1998) kunnen de stralingstemperaturen, die gemeten zijn met behulp van de zwarte bollen, aangenomen worden als de heersende gemiddelde stralingstemperaturen. Uit figuur A.11 blijkt dat de gemiddelde stralingstemperatuur slechts een kleine afwijking ($<0,3^{\circ}\text{C}$) vertoont van de gemiddelde luchttemperatuur. Deze afwijking is echter niet significant ($p < 0,001$). Er mag worden aangenomen dat er geen discomfort optreedt ten gevolge van afwijkende stralingstemperaturen. Ook de gemiddelde draught rating (tochtbeleving) blijft voor alle proefpersonen beneden de comfortgrens ($<20\%$) [ISO 7730, 2005].

8.2 Fysiologische parameters

In deze paragraaf worden de resultaten toegelicht, die verkregen zijn uit de metingen van de fysiologische parameters. Uit de resultaten blijkt dat er een groot verschil aanwezig is tussen beide meetsessies. Beide meetsessies zullen daarom apart behandeld worden. Allereerst zal er ingegaan worden op de lichaamskarakteristieken van de proefpersonen die hebben deelgenomen aan het onderzoek.

8.2.1 Proefpersonen

De lichaamskenmerken zijn bepaald aan de hand van de methoden die beschreven zijn in paragraaf 7.3.1. Voor alle proefpersonen zijn de lichaamskenmerken, voorafgaande aan beide meetsessie, opgemeten, berekend en bepaald. Aan de hand hiervan zijn de gemiddelden berekend; deze zijn weergegeven in tabel 8.1.

Tabel 8.1: Gemiddelde lichaamskenmerken proefpersonen (PP is proefpersoon)

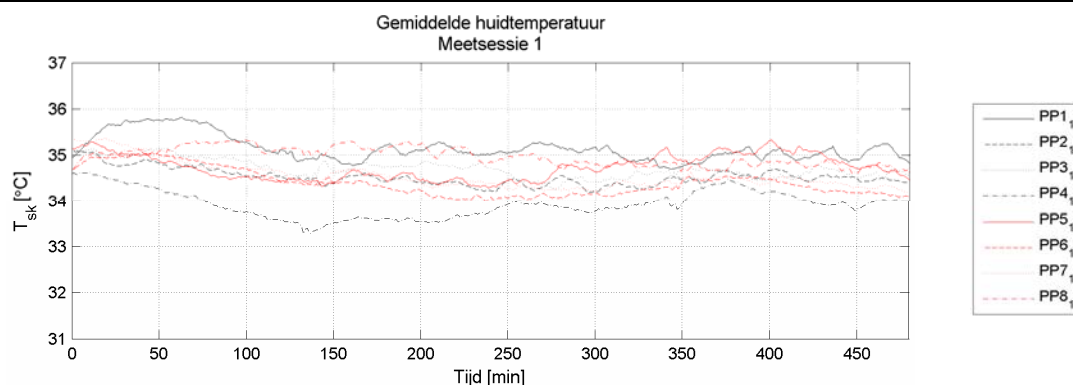
	Leeftijd [jaar]	Gewicht [kg]	Lengte [cm]	A_b [m ²]	BMI [-]	Totaal huidplooien [mm]	Vet% huidploo [%]	Vet% BMI [%]	Waist- to-hip ratio [-]	Taille omtrek [cm]
PP1	23	79,2	168,5	1,90	27,9	46	17,5	22,6	0,95	80,0
PP2	22	81,8	169,0	1,93	28,6	35	14,7	23,2	1,02	84,7
PP3	24	80,7	174,7	1,96	26,4	39	15,4	21,1	0,95	80,3
PP4	25	93,7	193,6	2,25	25,0	53	19,2	19,5	0,92	88,1
PP5	22	70,7	186,8	1,95	20,3	27	11,2	13,2	0,89	76,0
PP6	24	96,3	191,5	2,26	26,3	41	16,5	20,8	0,95	88,8
PP7	24	76,0	193,0	2,06	20,4	26	10,3	13,8	0,91	74,4
PP8	25	82,9	185,8	2,07	24,0	27	11,0	18,4	0,95	85,5

Uit bovenstaande tabel kan geconcludeerd worden dat de groep proefpersonen redelijk homogeen is. Tevens kan er geconcludeerd worden dat alle proefpersonen die deelgenomen hebben 'peervormig' zijn (zie paragraaf 7.3.1.3). Proefpersoon 7 wijkt het meest af van het gemiddelde wat betreft het vetpercentage. Dit vetpercentage is echter niet extreem laag, en aan de hand van de resultaten kan geconcludeerd worden dat dit geen grote invloed heeft gehad op de gemeten fysiologische parameters.

8.2.2 Meet sessie 1

Gedurende de meet sessies zijn de huidtemperaturen gemeten op 17 verschillende posities (zie paragraaf 7.3.2). De gemiddelde huidtemperatuur is berekend met behulp van de 14 punts weging die genormeerd is in de ISO 9886 norm (2004). Als maat voor de vasomotie wordt het temperatuurverschil aangehouden tussen de onderarm en de vingertop. Daarnaast wordt ook het temperatuurverschil berekend tussen het scheenbeen en de top van de middelste teen om te beoordelen of er verschillen bestaan tussen de mate van vasomotie bij de verschillende extremiteiten. Zoals eerder genoemd werd is de kerntemperatuur gemeten met behulp van een rectale sensor.

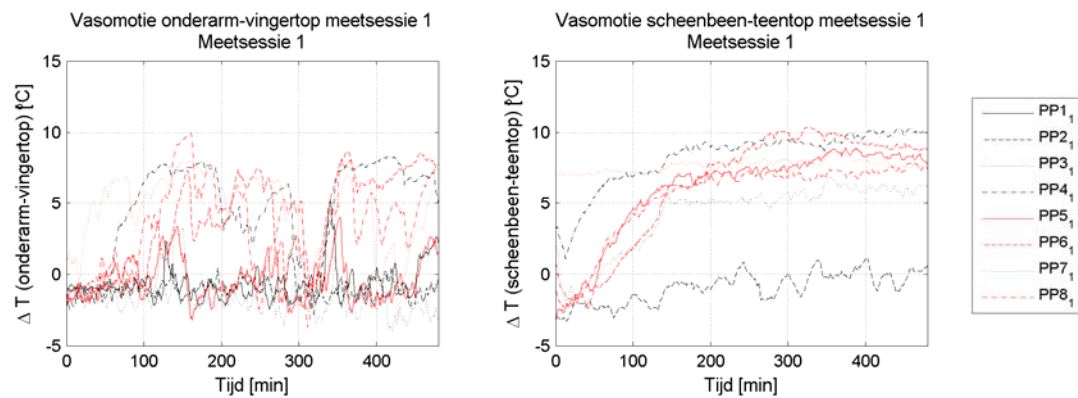
In figuur 8.5 zijn de resultaten weergegeven van de gemiddelde huidtemperatuur gedurende meet sessie 1 voor alle proefpersonen.



Figuur 8.5: Verloop gemiddelde huidtemperatuur meetsessie 1

Uit bovenstaande figuur blijkt dat de verschillen die optreden in de gemiddelde huidtemperatuur beperkt zijn. Uit tabel A.13 blijkt dat de spreiding in de gemiddelde huidtemperatuur gedurende meetsessie 1 ongeveer 1°C bedraagt. In figuur 8.6 is de vasomotie weergegeven voor zowel het temperatuurverschil tussen onderarm en vingertop als het temperatuurverschil tussen scheenbeen en teentop. Wanneer het temperatuurverschil positief is treedt vasoconstrictie (vaatvernauwing) op, als deze negatief is treedt vasodilatatie (vaatverwijding) op. Indien het verschil fluctueert met 1 á 2°C rond nul, treedt geen noemenswaardige vasomotie op [Wang et al., 2007]. Uit figuur 8.6 blijkt dat er een verschil bestaat tussen het temperatuurverschil van de onderarm en vingertop en het scheenbeen en teentop. Uit de linker grafiek blijkt dat alle proefpersonen bij aanvang van de meetsessie in vasodilatatie modus zijn ten gevolge van de lichte bewegingsoefening die werd uitgevoerd voor aanvang van het experiment. Na aanvang is er een duidelijk verschil aanwezig in de vasomotie tussen de verschillende proefpersonen. Een deel van de proefpersonen is gedurende de meetsessie continu in vasoconstrictie modus, terwijl bij het andere deel vasodilatatie en vasoconstrictie afwisselen. In de rechtergrafiek is waar te nemen dat het verloop in het temperatuurverschil tussen het scheenbeen en de teentop voor alle proefpersonen gelijk is, uitgezonderd proefpersoon 2. Na ongeveer 120 minuten stabiliseert het temperatuurverschil en is er sprake van vasoconstrictie. Ondanks dat de proefpersonen elk half uur oefeningen dienen te verrichten ter stimulering van de doorbloeding, lijkt toch dat de doorbloeding naar de voeten belemmerd wordt door het stil zitten. Ook de pauzes, waarin de proefpersoon mag lopen lijken hier geen invloed op te hebben. Bij proefpersoon 2 lijkt de doorbloeding niet negatief beïnvloed te worden.

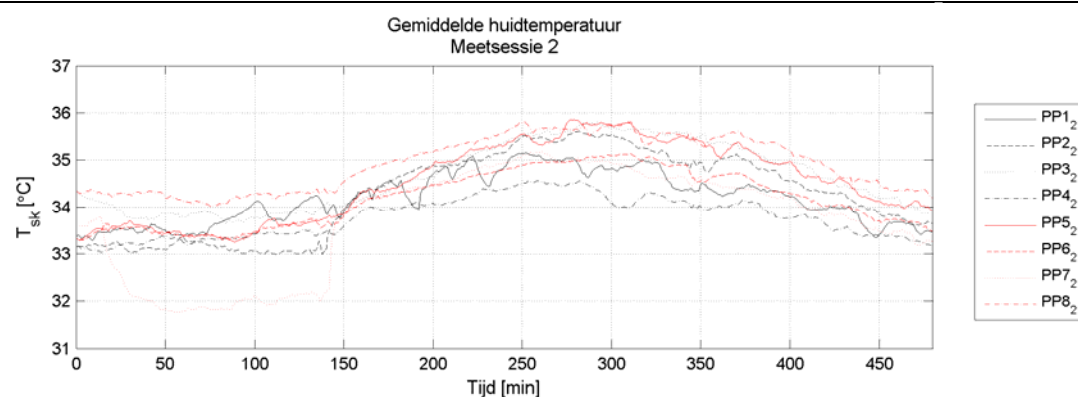
De kerntemperatuur blijft gedurende de meetsessie nagenoeg gelijk; de verschillen tussen de proefpersonen onderling zijn wel groot (zie tabel A.13 en figuur A.16).



Figuur 8.6: Verloop vasomotie meetsessie 1

8.2.3 Meetsessie 2

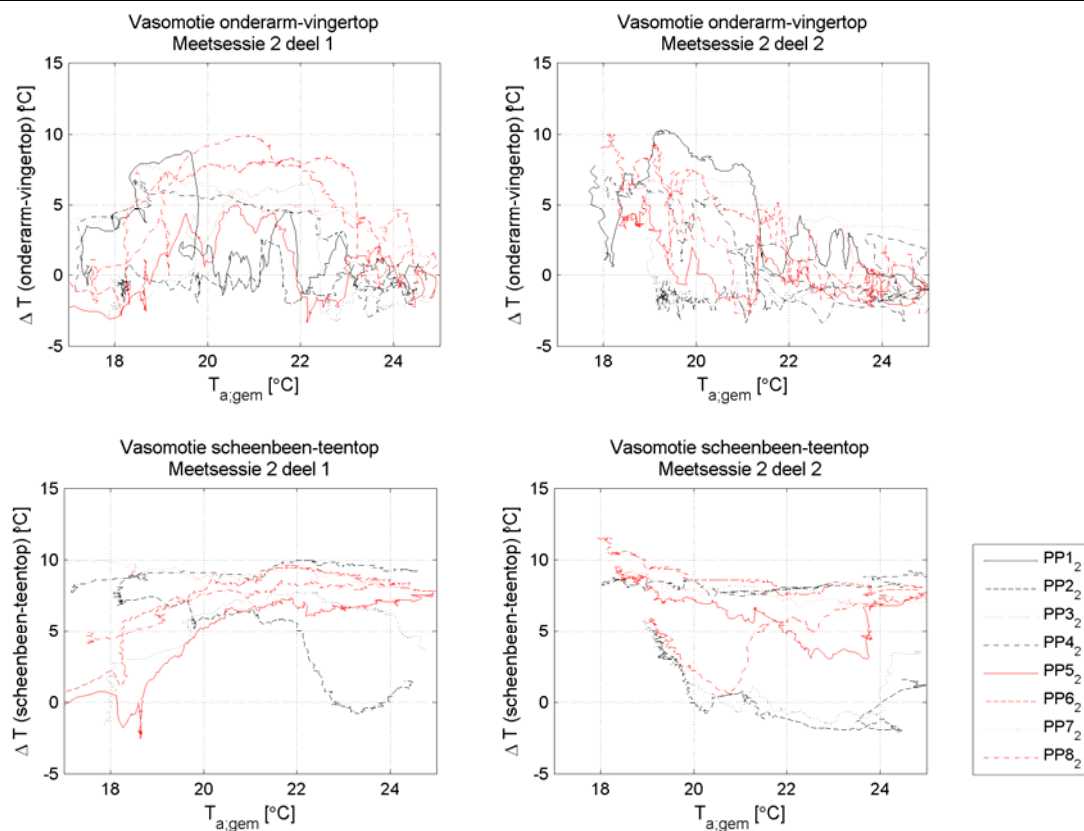
In figuur 8.7 zijn de gemiddelde huidtemperaturen voor alle proefpersonen gedurende meetsessie 2 weergegeven. Hieruit blijkt dat naarmate de tijd vordert (vanaf $t=150$ min) de gemiddelde huidtemperatuur het patroon volgt van de gemiddelde luchttemperatuur. Aan het begin van het experiment (tot $t=150$ min) blijft de gemiddelde huidtemperatuur nagenoeg constant. Proefpersoon 7 laat een duidelijk afwijkend verband zien ($P < 0,001$) in de gemiddelde huidtemperatuur aan het begin van de meetsessie. Gedurende meetsessie bedraagt de spreiding in de gemiddelde huidtemperatuur ongeveer $1,5^{\circ}\text{C}$. In tabellen A.15 tot en met A.18 zijn de gemiddelde waarden weergegeven op het moment dat de enquêtes ingevuld dienden te worden.



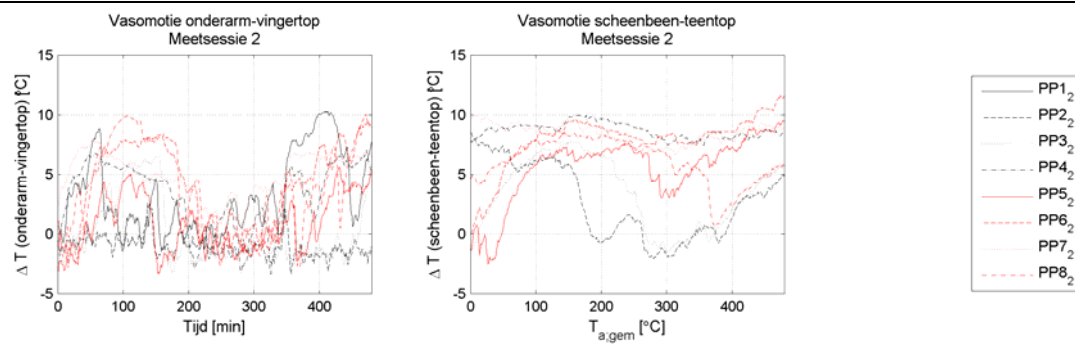
Figuur 8.7: Verloop gemiddelde huidtemperatuur meetsessie 2

In figuur 8.8 en 8.9 zijn de temperatuurverschillen, per deel van de meetsessie, weergegeven voor de onderarm en vingertop en voor het scheenbeen en de teentop. Hieruit blijkt dat er eveneens gedurende deze meetsessie een verschil bestaat in de mate van vasomotie. Naarmate de temperatuur stijgt, neemt het temperatuurverschil tussen de onderarm en vingertop af (vanaf $t=200$ min). Wanneer de temperatuur weer daalt in het tweede gedeelte van de meetsessie neemt dit verschil weer toe. Bij enkele proefpersonen (PP3, 4 en 5) is er gedurende de hoge temperaturen ook sprake van een geringe mate van vasodilatatie. Bij de overige proefpersonen fluctueert het temperatuurverschil met 1 á 2°C rond nul en is er niet duidelijk sprake van vasodilatatie. Er blijkt wel duidelijk dat het lichaam reageert op de veranderende luchttemperaturen. Bij het temperatuurverschil tussen het scheenbeen en de teentop zijn de reacties op de veranderende luchttemperaturen minder duidelijk. Ook gedurende meetsessie 2 wordt dit verschil voor bijna alle proefpersonen nagenoeg constant na ongeveer 120 minuten. Proefpersoon 2 en 3 vormen hier een uitzondering op. Er wordt eveneens verwacht dat de vasomotie in dit gedeelte van het lichaam belemmerd wordt door het langdurig stilzitten, waardoor de doorbloeding verslechtert. In tabellen A.15 tot en met A.18 zijn de gemiddelden waarden en de spreiding van alle proefpersonen opgenomen op de tijdstippen dat de enquêtes ingevuld dienden te worden.

De kerntemperatuur blijft gedurende deze meetsessie nagenoeg constant. De verschillen tussen de proefpersonen onderling zijn echter eveneens groot (zie tabellen A.15 t/m A.18 en figuur A.18).

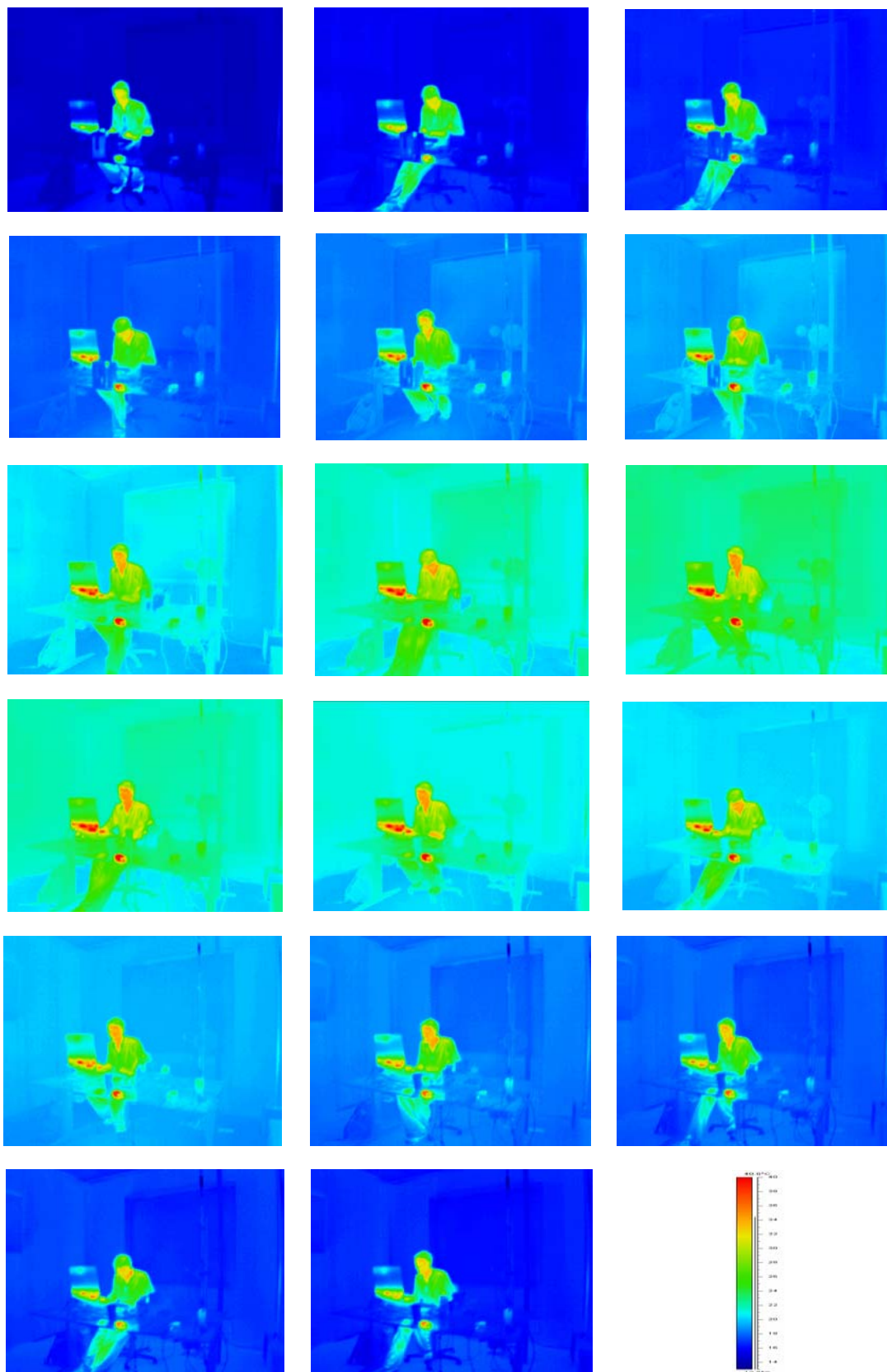


Figuur 8.8: Verloop vasomotie meetsessie 2



Figuur 8.9: Verloop vasomotie meet sessie 2

In figuur 8.10 zijn de huidtemperaturen van proefpersoon 5 gevisualiseerd met behulp van de infraroodopnamen gedurende meet sessie 2. De opnamen zijn gemaakt op de tijdstippen dat de enquêtes ingevuld dienden te worden. Aan de hand van de huidtemperaturen van proefpersoon 5 bleek dat de temperaturen van de voet en teen extreem laag waren ten opzichte van de overige proefpersonen. Na navraag gaf deze proefpersoon aan dat hij gedurende de winter vaak last had van zogenaamde 'wintervoeten', en hij weinig tot geen gevoel had in de voeten. In de infraroodopnamen is dit niet duidelijk zichtbaar. Wel is duidelijk zichtbaar dat de temperatuur van de onbedekte delen van het lichaam (o.a. het gezicht) variëren met de luchttemperatuur.



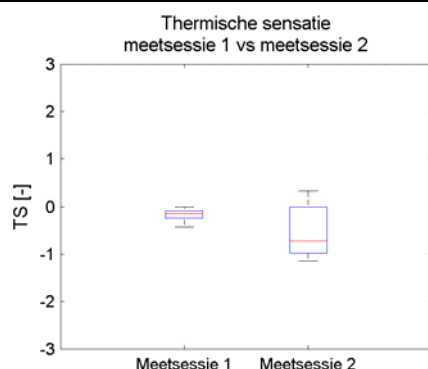
Figuur 8.10: Infraroodopnamen proefpersoon 5 gedurende meet sessie 2 ($t=0$ tot $t=480$ van links naar rechts);
tijdsinterval van 30 minuten

8.3 Resultaten comfortvragenlijsten

In deze paragraaf worden de resultaten toegelicht die verkregen zijn aan de hand van de comfortvragenlijsten. Aan de hand van deze resultaten is er onderzocht of er een relatie bestaat tussen de thermische sensatie en de gemeten parameters. Allereerst zal er ingegaan worden op de relatie tussen de thermische sensatie en de gemiddelde luchttemperatuur.

In figuur 8.11 is een boxplot weergegeven van de gemiddelde thermische sensatie tijdens meetsessie 1 (constante temperatuur) en meetsessie 2 (variërende temperatuur). De boxplot is een veelgebruikte methode in de statistiek om in een oogopslag informatie te verkrijgen over de ligging van de mediaan (rode lijn), de ligging van de middelste 50% van de waarnemingen (randen box) en de spreiding. Uit de weergegeven boxplot blijkt dat, zoals verwacht, de spreiding van de thermische sensatie voor meetsessie 2 veel groter is. Daarnaast blijkt ook dat minimale en maximale waarden die worden aangegeven tijdens meetsessie 2 de comfortgrenzen ($-0,5 < PMV < 0,5$) niet ver overschrijden; de maximale waarde blijft binnen de comfortgrens, de minimale waarde onderschrijdt de grens met 0,6. Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat de proefpersonen een koudere sensatie zwaarder laten wegen en sneller waarnemen dan een warme sensatie. Dit zou verklaard kunnen worden aan de hand van het feit dat personen gevoeliger zijn voor koude sensaties dan voor warme sensaties, hetgeen veroorzaakt wordt door de aanwezigheid van meer koudereceptoren in de huid (zie paragraaf 3.3.1). Een andere verklaring zou kunnen zijn dat de warme situatie niet als warm waargenomen wordt (zoals vooraf voorondersteld werd), maar als comfortabel.

De thermische sensatie ligt gedurende meetsessie 1 significant hoger dan de thermische sensatie gedurende meetsessie 2 ($p < 0,05$).

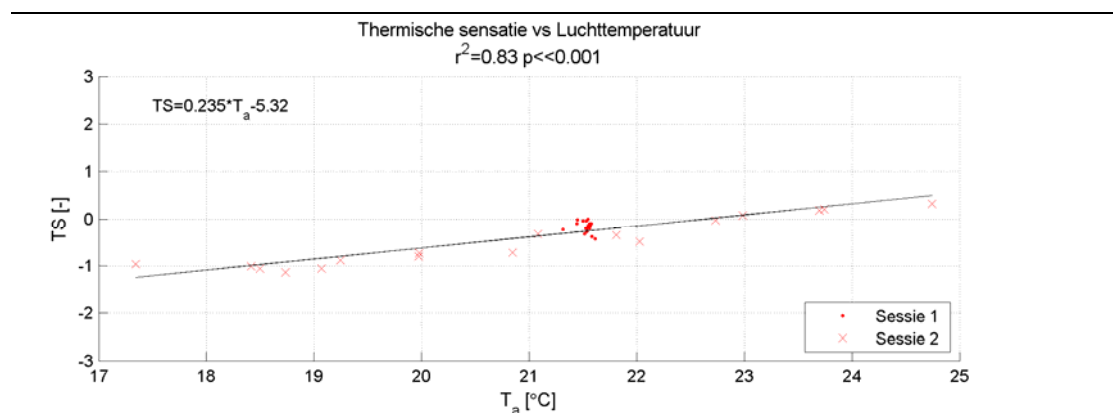


Figuur 8.11: Boxplot thermische sensatie meetsessies 1 en 2

Nu blijkt dat er een effect is van de luchttemperatuur op de thermische sensatie zal er onderzocht worden welke parameters nog meer van invloed zijn op deze thermische sensatie en zal er getracht worden een verband te leggen tussen de thermische sensatie en de gemeten parameters.

8.3.1 Thermische sensatie vs luchttemperatuur

Voor de regressieanalyse is gebruik gemaakt van de meetdata op de tijdstippen dat de enquêtes zijn afgenomen (iedere 30 minuten van de meetsessie). In figuur A.18 is de thermische sensatie weergegeven per proefpersoon. Hierbij is de meetsessie opgedeeld in twee delen: het eerste deel van de meetsessie waarbij de luchttemperatuur stijgt en het tweede gedeelte waarin de luchttemperatuur daalt. Uit figuur A.36 en figuur A.37 blijkt dat bij alle proefpersonen de thermische sensatie stijgt naarmate de luchttemperatuur stijgt. In figuur 8.12 is het gevonden regressiemodel weergegeven voor alle proefpersonen en beide meetsessies; hierin is de gemiddelde luchttemperatuur nabij het comfortstatief de onafhankelijke variabele. Uit het kwadraat van de correlatiecoëfficiënt blijkt dat 83% van de variantie met behulp van het model verklaard kan worden, de gevonden relatie wordt als significant bevonden.

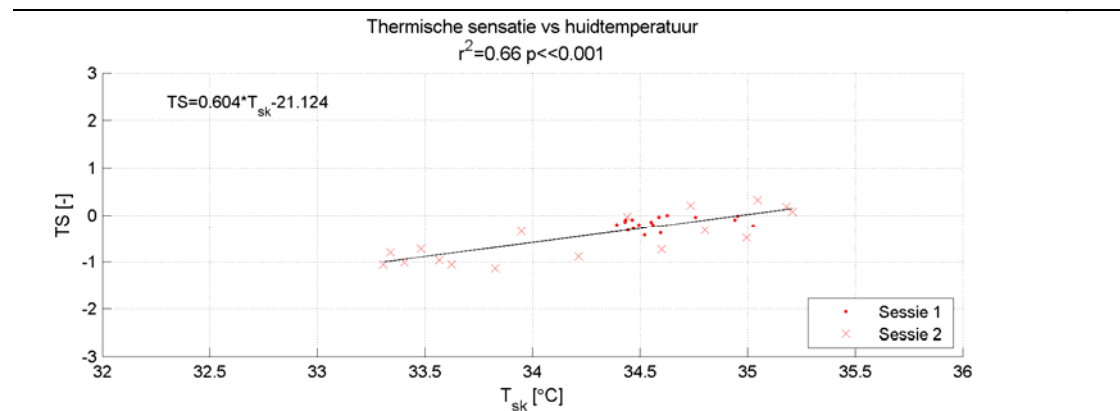


Figuur 8.12: Thermische sensatie versus luchttemperatuur

8.3.2 Thermische sensatie vs huidtemperatuur

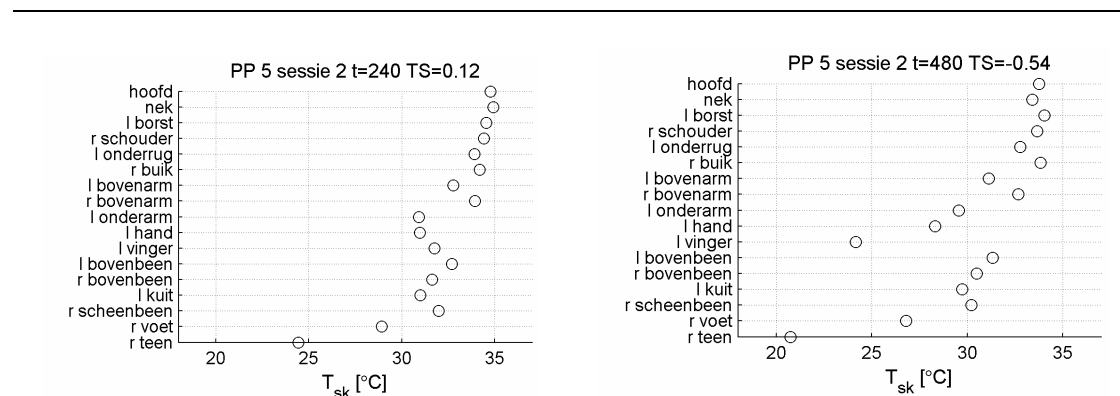
Naast de invloed van de luchttemperatuur op de thermische sensatie, wordt er ook verwacht dat de gemiddelde huidtemperatuur een invloed heeft op de thermische sensatie. Het regressiemodel dat is opgesteld voor het vastleggen van de relatie tussen de gemiddelde huidtemperatuur en de thermische sensatie is op dezelfde wijze tot stand gekomen als het model dat hiervoor beschreven werd. Eveneens werden er geen afwijkende verbanden gevonden voor de individuele proefpersonen; de thermische sensatie stijgt naarmate de

huidtemperatuur stijgt. In figuur 8.13 is de gevonden relatie weergegeven. Het gevonden model is significant bevonden, in dit geval kan 66% van de variantie kan verklaard worden met behulp van het model.



Figuur 8.13: Thermische sensatie versus huidtemperatuur

Daarnaast is het ook mogelijk om een relatie te leggen tussen de thermische sensatie van de proefpersonen en de lokale huidtemperaturen van de lichaamssegmenten. Dit kan gedaan worden op een vergelijkbare wijze als waarop de EHT temperaturen weergegeven worden in het Berkeley model (zie paragraaf 4.2). Op deze manier kan een beeld verkregen worden van de temperatuurverdeling over het gehele lichaam. In figuur 8.14 is de temperatuurverdeling over het lichaam weergegeven van proefpersoon 5 op tijdstip $t=240$ min ($T_a=25^\circ\text{C}$) en $t=480$ min ($T_a=18^\circ\text{C}$). Hierin is duidelijk te zien dat bij de koudere omgevingstemperaturen voornamelijk de huidtemperaturen van de extremiteiten (vinger en teen) kouder worden. De temperaturen van de overige delen van het lichaam blijven nagenoeg gelijk. In figuur A.17 en figuur A.19 tot en met A.35 zijn de temperatuurverdelingen opgenomen voor alle proefpersonen. Voor meet sessie 1 is dit weergegeven voor de gemiddelden over de gehele meet sessie, voor meet sessie 2 zijn de temperaturen uitgezet op het moment dat de enquêtes ingevuld dienden te worden.



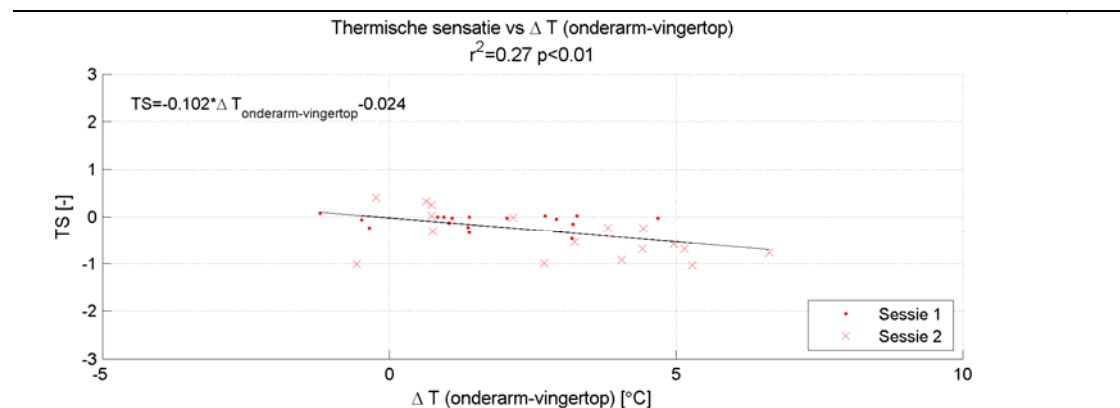
Figuur 8.14: Temperatuurverdeling over het lichaam proefpersoon 5 meet sessie 2 $t=240$ en $t=480$

8.3.3 Thermische sensatie vs kerntemperatuur

In paragraaf 8.2.3 bleek al dat de onderlinge variatie in de kerntemperatuur groot is, dit blijkt eveneens uit figuur A.40 en A.41. Aan de hand van deze figuren kan eveneens geconstateerd worden dat er zowel op groepsniveau als op individueel niveau geen verband bestaat tussen de gemeten kerntemperatuur en de thermische sensatie.

8.3.4 Thermische sensatie vs vasomotie

Aan de hand van figuur A.x blijkt dat de proefpersonen 2 en 6 een positieve relatie vertonen tussen het temperatuurverschil van de onderarm en vingertop en de thermische sensatie. In het model dat is opgesteld voor het bepalen van de relatie tussen de thermische sensatie en dit temperatuurverschil zijn deze twee proefpersonen dan ook weggelaten. In figuur 8.15 is het gevonden verband weergegeven. Het gevonden model wordt significant bevonden, echter slechts 27% van de variantie kan verklaard worden met behulp van het model.



Figuur 8.15: Thermische sensatie versus $\Delta T_{\text{onderarm-vingertop}}$ (zonder proefpersonen 2 en 6)

Naast het bepalen van de vasomotie aan de hand van het temperatuurverschil tussen de onderarm en de vingertop, kan de vasomotie ook bepaald worden aan de hand van het temperatuurverschil tussen het scheenbeen en de teentop. Eerder bleek dat deze gradiënt na ongeveer 120 minuten stabiliseerde en niet meer veranderde. Naar aanleiding van dit gegeven en het opgestelde model (zie figuur A.44 en A.45) blijkt dat dit verschil in dit geval geen goede indicator is voor de thermische sensatie.

8.3.5 Meervoudige regressie thermische sensatie

Naar aanleiding van het voorgaande kan geconcludeerd worden dat meerdere parameters een significante relatie vertonen met de thermische sensatie. Met behulp van meervoudige regressie is er bekeken welke parameters bepalend zijn voor de thermische sensatie. Voor een adequate voorspelling van de thermische sensatie is het van belang dat dit gedaan wordt aan de hand van een minimaal aantal parameters. Voor het opstellen van het meervoudige regressiemodel is gebruik gemaakt van het statistische softwarepakket SPSS 15.0. Binnen deze regressie zijn alleen de parameters betrokken die in het voorgaande een significant verband vertoonden met de thermische sensatie.

In tabel 8.2 zijn de resultaten weergegeven van het lineaire regressiemodel waarin de luchttemperatuur, de huidtemperatuur en het temperatuurverschil tussen onderarm en vingertop als maat voor de thermische sensatie betrokken zijn. Aan de hand van de significantie van de individuele parameters kan vastgesteld worden of zijn een significante bijdrage leveren aan het model. Uit het model blijkt dat de mate van vasomotie geen significante invloed heeft op de thermische sensatie. De aangepaste determinatiecoëfficiënt (R^2_{adj}) bedraagt 0,31; dit betekent dat 31% van de variantie verklaard kan worden met behulp van het model dat is weergegeven in onderstaande. Deze relatie kan als zwak worden beschouwd.

Tabel 8.2: Resultaten meervoudig regressiemodel met T_a , T_{sk} en $\Delta T_{\text{(onderarm-vingertop)}}$ als voorspellende parameters ($N=272$)

Onafhankelijke variabelen	Richtingscoëfficiënt	Significantie (p)	R^2_{adj}
Luchttemperatuur (T_a)	0,203	0,000	0,31
Gemiddelde huidtemperatuur (T_{sk})	0,165	0,015	
Vasomotie ($\Delta T_{\text{(onderarm-vingertop)}}$)	0,013	0,220*	

* Variabele wordt als niet significant beschouwd

Wanneer de luchttemperatuur uit het model wordt weggelaten is het temperatuurverschil tussen de onderarm en de vingertop nog steeds niet significant als onafhankelijke parameter ($p=0,20$), R^2_{adj} bedraagt in dit geval 0,18. Indien het temperatuurverschil tussen de onderarm en de vingertop als onafhankelijke variabele uit het model wordt gelaten bedraagt R_{adj} eveneens 0,31. Het opgestelde model ziet er dan als volgt uit:

$$TS = 0,204 \cdot T_a + 0,14 \cdot T_{sk} - 9,474 \quad (8.1)$$

Doordat meet sessie 2 is opgedeeld in twee delen met een opwaarts en neerwaarts temperatuurverloop wordt er verwacht dat dit ook een invloed heeft op de thermische sensatie. Door het invoeren van een dummyvariabele kan bepaald worden wat hier de

invloed van is. Daarnaast is ook de proefpersoon ingevoerd als dummyvariabele, op deze manier kan een duidelijk beeld verkregen worden wat de invloed is van de proefpersonen op het regressiemodel. In tabel 8.3 zijn de resultaten weergegeven van deze meervoudige regressieanalyse. Uit deze tabel blijkt, zoals verwacht, dat de proefpersoon een significante invloed heeft op de thermische sensatie. Echter deze variabele meenemen als voorspellende parameter in het regressie model is niet wenselijk, omdat het opgestelde model dan alleen toegepast kan worden voor de proefpersonen die hebben deelgenomen aan het onderzoek. Het gedeelte van de meetsessie blijkt geen significante invloed te hebben op de thermische sensatie ($p > 0,05$).

Tabel 8.3: Resultaten meervoudig regressiemodel met T_{ar} , T_{sk} als voorspellende parameters en proefpersoon en deel meetsessie als dummyvariabele ($N=272$)

Onafhankelijke variabelen	Significantie (p)	R^2_{adj}
Proefpersoon	0,000	0,89
Deel meetsessie	0,316	

Het opgestelde regressiemodel wijkt sterk af van het model af dat door Fiala (Fiala, 1998) werd ontwikkeld voor het voorspellen van de dynamische thermische sensatie (zie Appendix 1). In het model voor het voorspellen van de dynamische sensatie (DTS) zijn de kerntemperatuur, de gemiddelde huidtemperatuur en de snelheid waarmee de gemiddelde huidtemperatuur van invloed op de thermische sensatie. Na een meervoudige regressieanalyse enkel met deze parameters blijken deze binnen dit onderzoek eveneens een significante invloed te hebben (zie tabel 8.4). Echter, de verklaarde variatie bedraagt slechts 22% (R^2_{adj} is 0.22). Aan de hand hiervan kan gesteld worden dat de relatie tussen deze parameters en de thermische sensatie zeer zwak is. In het voorgaande werd geconcludeerd dat de proefpersonen 2 en 6 een positief verband lieten zien tussen de kerntemperatuur en de thermische sensatie. Indien deze niet meegenomen worden in het regressiemodel, verbetert R^2_{adj} echter niet.

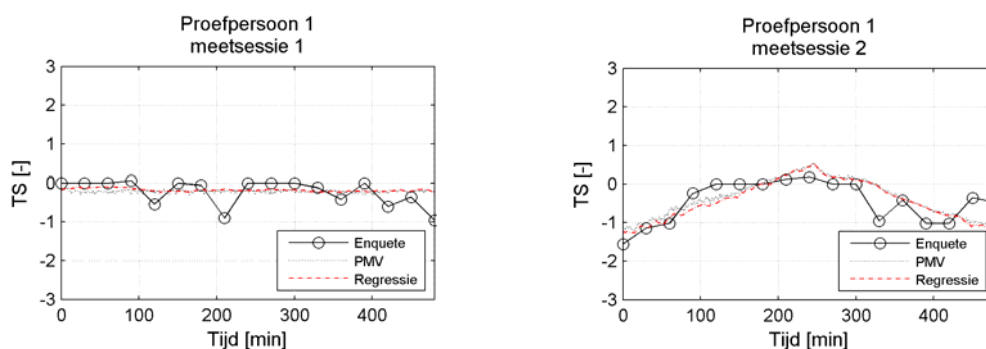
Tabel 8.4: Resultaten meervoudig regressiemodel met T_{sk} , T_{core} en dT_{sk}/dt als voorspellende parameters ($N=272$)

Onafhankelijke variabelen	Significantie (p)	R^2_{adj}
Gemiddelde huidtemperatuur (T_{sk})	0,000	0,22
dT_{sk}/dt (t in seconden)	0.021	
Kerntemperatuur (T_{core})	0.003	

Indien in bovenstaand regressiemodel het temperatuurverschil tussen onderarm en vingertop betrokken wordt, dan blijkt deze parameter eveneens niet significant te zijn als verklarende variabele ($p=0,10$). Hieruit kan geconcludeerd worden dat binnen dit onderzoek er geen verband bestaat tussen de thermische sensatie en de mate van vasomotie.

8.3.6 Vergelijking thermische sensatie enquête, PMV en regressie

In hoofdstuk 5 bleek dat het PMV model dat Fanger ontwikkelde niet in alle situaties een goede voorspelling geeft voor de thermische sensatie. Binnen dit hoofdstuk werd een regressievergelijking (vergelijking 8.6) opgesteld voor het voorspellen van het thermisch comfort aan de hand van de meetresultaten. In figuur 8.16 is voor proefpersoon 1 de thermische sensatie aan de hand van de regressievergelijking, het PMV model en de enquête weergegeven. Hieruit blijkt dat het model dat opgesteld is aan de hand van de meervoudige regressieanalyse een nauwe overeenkomst vertoont met het PMV model. Dit is eveneens zichtbaar voor de overige proefpersonen (zie figuur A.48 en figuur A.49). De conclusie die werd getrokken in eerdere onderzoeken dat het PMV model in koude situaties de sensatie onderschat, en in warme situaties de sensatie overschat, kan binnen dit onderzoek niet worden getrokken. Dit onderzoek is echter uitgevoerd onder laboratoriumcondities, hierdoor kunnen de resultaten niet vergeleken worden met resultaten die verkregen zijn aan de hand van praktijkonderzoeken.



Figuur 8.16: Thermische sensatie meting, PMV model en regressiemodel voor proefpersoon 1 (links: meetsessie 1, rechts: meetsessie 2)

8.3.7 Overige parameters

SBS symptomen

Gedurende de meetsessie werd er ook gevraagd naar SBS symptomen. Uit de resultaten blijkt dat er geen significant ($p > 0,05$) verschil bestaat in het aantal gerapporteerde symptomen tussen meetsessie 1 en 2. Wel bleek dat in het tweede gedeelte van de meetsessie vaker SBS symptomen gemeld werden, dan in het eerste gedeelte van de meetsessie. Dit verschil werd eveneens niet significant bevonden ($p > 0,05$). Daarnaast kwam naar voren dat slaperigheid gedurende meetsessie 1 het meest gemeld werd, gedurende meetsessie 2 werd hoofdpijn het meest gerapporteerd. Deze verschillen zijn echter zeer

gering, er bestaat dan ook geen aanleiding om aan te nemen dat dit verschil veroorzaakt wordt door het type meetsessie.

Wensen en comfort

Bij het ontwerpen van een gebouw en klimaatinstallatie gaat het in de eerste instantie niet zozeer om de thermische sensatie die gerealiseerd wordt, maar meer om de tevredenheid van de gebruikers. Binnen dit onderzoek werd er ook gevraagd naar het thermisch comfort en de wensen van de proefpersoon. In Appendix A.10.6 zijn de resultaten van deze vragen weergegeven. Hieruit blijkt dat de proefpersonen zich over het algemeen gedurende meetsessie 1 licht comfortabel tot comfortabel voelen. Gedurende meetsessie 2 voelen de proefpersonen zich voornamelijk aan het begin en aan het einde van de meetsessie licht oncomfortabel tot oncomfortabel. Echter als gekeken wordt naar de aanvaardbaarheid van deze condities dan blijkt dat de proefpersonen over het algemeen de situatie acceptabel vinden.

8.4 Resultaten productiviteitstaken

Een van de doelen binnen dit onderzoek was om te bepalen wat de invloed is van fluctuerende temperaturen op de productiviteit en prestatie van personen. Om dit te kunnen beoordelen werden er een tweetal taken geformuleerd: een rekentaak en een teksttaak (zie hoofdstuk 7). In deze paragraaf zullen de resultaten van beide taken toegelicht worden. Als eerste zal er ingegaan worden op de resultaten en de analyse van de rekentaak.

8.4.1 Resultaten rekentaak

Als maat voor de productiviteit werd het aantal gemaakte sommen per vragenlijst aangehouden. Op basis van het percentage aantal correcte sommen wordt een uitspraak gedaan over de prestatie van de proefpersonen.

Om de proefpersonen onderling met elkaar te kunnen vergelijken werden de data voorafgaande aan de analyse genormaliseerd. Hierbij werden de scores van iedere proefpersoon gerelateerd aan de maximale score die de proefpersoon behaald had; de maximale score werd gelijk gesteld aan 1,00. Om te onderzoeken of er een invloed bestaat van de temperatuur op deze twee parameters werden er verschillende analyses verricht voor de resultaten die verkregen werden aan de hand van meetsessie 2.

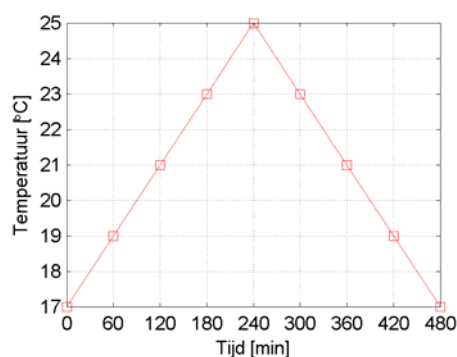
8.4.1.1 Gemaakte aantal sommen versus luchttemperatuur

Als eerste werd met behulp van een lineair regressiemodel onderzocht of er een relatie bestaat tussen de luchttemperatuur (gemiddelde luchttemperatuur nabij comfortstatief) en het gemaakte aantal sommen. De luchttemperatuur werd gemiddeld over de periode dat de vragenlijst ingevuld werd (10 minuten). Hierbij werden de delen van de meetsessie opgesplitst en apart bekeken, de resultaten hiervan zijn weergegeven in figuur A.50. Hieruit blijkt dat de verschillen tussen de proefpersonen onderling groot zijn. Eveneens blijkt hieruit, dat er in sommige gevallen wel sprake is van een relatie, maar voor geen enkele proefpersoon is deze relatie significant. Uit een eerder onderzoek dat verricht werd door Seppänen en Fisk (2005) bleek dat er een kwadratisch verband bestond tussen de prestatie en de temperatuur; hierbij werd een optimum gevonden bij 21,5°C (zie hoofdstuk 6). Naar aanleiding hiervan werd ook een kwadratisch regressiemodel opgesteld; hiertoe zijn de delen van de meetsessie samengevoegd om meer datapunten te verkrijgen. De resultaten hiervan zijn weergegeven in figuur A.51. Met behulp van een kwadratisch regressiemodel kan eveneens geen significante relatie gevonden worden tussen het aantal gemaakte sommen en de luchttemperatuur.

Daarna werd er bekeken met behulp van een gepaarde t-toets of er een significant verschil bestaat tussen de delen van de meetsessie; dit werd gedaan per temperatuur stap (t=60 en t=420 werden met elkaar vergeleken, t=120 en t=360 werden met elkaar vergeleken etc., zie tabel 8.5 en figuur 8.17). Hieruit blijkt dat er geen significante verschillen bestaan tussen het gemaakte aantal sommen gedurende deel 1 en 2 van de meetsessie.

Tabel 8.5: Overzicht temperatuur en tijdstappen voor rekentaak

Meetsessiedeel	1					2				
Tijd [min]	0	60	120	180	240	300	360	420	480	
T _{a,gem} [°C]	17	19	21	23	25	23	21	19	17	



Figuur 8.17: Tijdstippen en temperaturen rekentaak

8.4.1.2 Gemaakte aantal sommen versus huidtemperatuur

De analyse van het aantal gemaakte sommen versus de huidtemperatuur is op eenzelfde wijze verricht als de analyse die in het voorgaande werd beschreven. De huidtemperatuur werd eveneens gemiddeld over de periode dat de vragenlijst ingevuld werd (10 minuten). Met behulp van een lineair regressiemodel is bekeken of er een relatie bestond tussen de gemiddelde huidtemperatuur en het aantal gemaakte sommen. Dit werd gedaan voor de aparte delen van de meetsessie. De resultaten zijn weergegeven in figuur A.52. Aan de hand van deze resultaten blijkt dat de verschillen tussen de proefpersonen onderling groot zijn. Ook hier kan geen eenduidige uitspraak gedaan worden over het verband tussen de gemiddelde huidtemperatuur en het aantal gemaakte sommen.

8.4.1.3 Percentage correcte sommen versus luchttemperatuur

Voorafgaande aan het experiment werd verwacht dat tussen het percentage correcte sommen en de luchttemperatuur een duidelijk verband bestaat. Voor de analyse is er net zoals in het voorgaande allereerst gekeken naar de lineaire relatie tussen het percentage correcte sommen voor de delen van de meetsessie afzonderlijk (zie figuur A.53). Hieruit blijkt dat alle scores dicht bij de maximale score liggen, waardoor er geen duidelijk onderscheid gemaakt kan worden. Doordat de scores zo dicht bij elkaar liggen is het moeilijk om een verband te leggen tussen het percentage correcte sommen en de luchttemperatuur. Ook aan de hand van de kwadratische regressie kan geen relatie gelegd worden (zie figuur A.54).

Vervolgens zijn de resultaten voor de afzonderlijke delen vergeleken aan de hand van tabel 8.4. Ook hier werd geen significant verschil gevonden voor de afzonderlijke delen van de meetsessie. Daarnaast werd ook de score gemiddeld per deel van de meetsessie. Hieruit bleek dat de sommen gedurende het tweede gedeelte van meetsessie 2 gemiddeld 0,9% beter gemaakt werden. Dit kleine verschil werd echter niet significant ($p > 0,05$) bevonden. Deze geringe verbetering werd ook gevonden bij het tweede gedeelte van meetsessie 1; hier werden de sommen gemiddeld 0,4% beter gemaakt ten opzichte van het eerste gedeelte.

8.4.1.4 Percentage correcte sommen versus huidtemperatuur

De resultaten van de lineaire regressieanalyse van het percentage correcte sommen versus de gemiddelde huidtemperatuur is weergegeven in figuur A.55. Hieruit blijkt dat er eveneens geen relatie bestaat tussen het percentage correcte sommen en de gemiddelde huidtemperatuur.

8.4.1.5 Meervoudige regressie

Met behulp van een meervoudige regressieanalyse is bekeken welke overige parameters een significante invloed hebben op het gemaakte aantal sommen en het correcte aantal sommen. Hieruit blijkt dat alleen de proefpersoon (welke als dummyvariabele is ingevoerd) een voorspellende parameter is. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het niet mogelijk is om uitspraken te doen voor algemene situaties.

8.4.2 Resultaten teksttaak

Als maat voor de productiviteit werd het aantal getypte karakters per minuut aangehouden. De prestatie werd bepaald aan de hand van het percentage correcte karakters en het aantal correcte karakters per minuut. Het percentage correcte karakters kan berekend worden uit één minus de verhouding tussen de Levenshtein afstand en het aantal getypte karakters. Het aantal correcte karakters per minuut kan berekend worden door het percentage correcte karakters te vermenigvuldigen met het aantal getypte karakters per minuut. Hierbij werd aangenomen dat het evenveel tijd kostte om een woord te typen als het te verbeteren. Het enige probleem van deze vooronderstelling is dat het moeilijk is om vast te stellen welke proefpersoon de beste prestatie levert: een proefpersoon die snel typt maar hierdoor veel fouten maakt of een proefpersoon die langzamer typt maar wel minder fouten maakt. In een eerder onderzoek dat verricht werd door Lantner en Svanekiaer (2005) werd vastgesteld dat één procent typfouten overeenkomt met 1,5 getypt karakter per minuut. Dat wil zeggen dat wanneer een persoon een typfout maakt tijdens normaal kantoorwerk (hetgeen hij dus dient te corrigeren voordat hij door kan gaan), het evenveel tijd kost om dit te corrigeren als het typen van 1,5 karakter per minuut. Om deze reden werd het aantal correcte karakters per minuut vermenigvuldigd met 1,5. Om de proefpersonen onderling met elkaar te kunnen vergelijken werden de data eveneens genormaliseerd.

Door een fout in de webapplicatie konden slechts de eerste vier regels van elke getypte tekst opgeslagen worden in de database. Hierdoor kon de analyse slechts over een klein gedeelte verricht worden, waardoor er een vertekend beeld kan ontstaan. Dit heeft voornamelijk een invloed gehad op het percentage correcte karakters (dit is bijna in alle gevallen 100%), vanwege deze reden is deze parameter verder niet meegenomen in de analyse van de teksttaak.

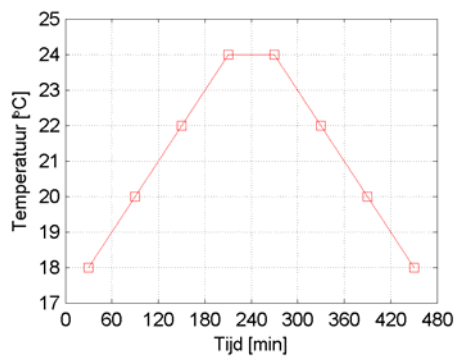
8.4.2.1 Aantal getypte karakters per minuut versus luchttemperatuur en huidtemperatuur

In de literatuur werden lineaire relaties gevonden met het aantal getypte karakters per minuut en de luchttemperatuur (o.a. Lantner en Svanekiaer, 2005; Tanabe, 2006). In figuur A.56 zijn de resultaten weergegeven die verkregen zijn aan de hand van het lineaire regressiemodel dat binnen dit onderzoek werd opgesteld voor het onderzoeken van de relatie tussen het

aantal getypte karakters per minuut en de luchttemperatuur (gemiddeld over 10 minuten). Hieruit blijkt dat er een groot verschil bestaat tussen de proefpersonen onderling. Tevens bestaat er ook een groot verschil tussen de delen van de meetsessie; deze verschillen zijn echter niet consistent. Daarnaast zijn de twee delen van de meetsessie per tijdstap (zie tabel 8.6 en figuur 8.18) met behulp van gepaarde t-toetsen met elkaar vergeleken. Ook hier werden geen significante verschillen gevonden.

Tabel 8.6: Overzicht temperatuur en tijdstappen voor teksttaak

Meetsessiedeel	1				2			
Tijd [min]	30	90	150	210	270	330	390	450
T _{a,gem} [°C]	18	20	22	24	24	22	20	18



Figuur 8.18: Tijdstippen en temperaturen teksttaak

In figuur A.57 zijn de resultaten opgenomen van het lineaire regressiemodel dat geformuleerd werd voor de relatie tussen het aantal getypte karakters per minuut en de gemiddelde huidtemperatuur. Ook hier werd geen significante relatie gevonden.

8.4.2.2 Aantal goede karakters per minuut versus luchttemperatuur en huidtemperatuur

In figuur A.58 en figuur A.59 zijn de resultaten weergegeven van de lineaire regressiemodellen die opgesteld ten behoeve van het bepalen van de relatie met het aantal correcte karakters met respectievelijk de luchttemperatuur en de gemiddelde huidtemperatuur. Hieruit blijkt eveneens dat er geen significante relaties binnen dit onderzoek bestaan voor deze beide parameters.

8.4.2.3 Meervoudige regressie

Tot slot werd er aan de hand van een meervoudige regressieanalyse bepaald of er andere parameters zijn die een significante invloed hebben op het aantal getypte karakters per minuut en het aantal correcte karakters per minuut. Hieruit blijkt eveneens dat alleen de proefpersoon een voorspellende parameter is. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het ook voor de teksttaak niet mogelijk is om uitspraken te doen voor algemene situaties. Hierbij dient wel bedacht te worden dat de analyse alleen verricht is voor de eerste vier regels van elke getypte tekst.

Zowel voor de teksttaak als voor de rekentaak blijkt dat de scores van de testen bij alle proefpersonen tegen de maximale score aan ligt. Hierdoor zijn de onderlinge verschillen zeer gering, waardoor er geen uitspraken gedaan kunnen worden over eventuele invloeden van de omgevingstemperatuur.

Deel D

Simulaties

9. Resultaten thermofysiologisch model

Binnen dit onderzoek werd voor het verrichten van de simulaties gebruik gemaakt van het thermofysiologisch model dat ontwikkeld is bij de faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven in samenwerking met de Universiteit van Maastricht. Het model is op dit moment nog steeds in ontwikkeling, en het doel binnen dit onderzoek is om een bijdrage te kunnen leveren aan de validatie van het model onder fluctuerende omgevingstemperaturen. Dit model vormt een uitbreiding op het model van Fiala (1998). In paragraaf 4.3 en 4.4 is de opbouw van het Fiala model en het binnen dit onderzoek toegepaste model (WBTfun model) uitgebreid aan bod gekomen.

In dit hoofdstuk komen de resultaten aan bod die verkregen zijn met behulp van het model. Hierbij wordt er een vergelijking gemaakt tussen de resultaten die verkregen zijn met behulp van de simulaties van het standaard model en de resultaten die verkregen zijn aan de hand van het geïndividualiseerde model. Allereerst zullen de randvoorwaarden besproken worden die gehanteerd zijn voor de simulaties met het geïndividualiseerde model.

9.1 Randvoorwaarden

In deze paragraaf worden de randvoorwaarden besproken die gehanteerd zijn voor de simulaties met behulp van het geïndividualiseerde model.

9.1.1 Lichaamskenmerken proefpersonen

De resultaten van de metingen ten behoeve van het vaststellen van de lichaamskenmerken dienen als invoer voor het model (zie paragraaf 8.3.1). Op basis van de lengte, het gewicht en het vetpercentage van de persoon wordt een model gemaakt. Dit wordt gedaan door het verscalen van de lichaamselementen (zie paragraaf 4.4). Tevens is het mogelijk om binnen het model een onderscheid te maken in 'peervormige' en 'appelvormige' personen; hierdoor kan de vetverdeling over het lichaam benaderd worden. Uit de lichaamskarakteristieken van de proefpersonen blijkt dat er binnen dit onderzoek alleen 'peervormige' personen hebben deelgenomen; deze vetverdeling wordt dan ook als randvoorwaarde ingevoerd in het model. Eventuele verschillen tussen de simulatieresultaten en de gemeten resultaten die zouden kunnen ontstaan, kunnen te wijten zijn aan de invoer van het vetpercentage. Binnen dit onderzoek is het vetpercentage bepaald aan de hand van huidplooiemetingen die verricht zijn op vier posities op het lichaam, hetgeen een vertekend beeld kan geven.

9.1.2 Metabolisme

Voor een zittend persoon die lichte kantoorwerkzaamheden verricht kan aangehouden worden dat deze een activiteitsniveau heeft wat overeenkomt met 70 W/m^2 (1,2 met), zie tabel 3.1. Binnen dit onderzoek wordt er voorondersteld dat dit activiteitsniveau gedurende de gehele meet sessie constant is geweest.

9.1.3 Kleding

De eigenschappen van de kleding kunnen in het model per lichaamselement, en indien gewenst per lichaamsegment, ingevoerd worden. Voor de invoer van de kleding eigenschappen is gebruikt gemaakt van het omrekenprogramma dat Fiala opstelde om de kleding eigenschappen om te rekenen per lichaamselement. Tevens is de thermische weerstand van de bureaustoel ook meegenomen in het onderzoek. De weerstand hiervan is alleen toegekend aan de lichaamsdelen die hier ook daadwerkelijk mee in contact staan; de achterzijde van de onderbuik (onderrug) en de achterzijde van de bovenbenen.

9.1.4 Omgevingscondities

Uit de resultaten in hoofdstuk 8 bleek dat de condities rondom de proefpersoon uniform waren gedurende de meet sessies. In het simulatiemodel zijn deze condities dan ook als uniform ingevoerd. Voor de luchttemperatuur is de gemiddelde luchttemperatuur nabij het comfortstatief aangehouden. Voor de luchtsnelheid is eveneens de gemiddelde luchtsnelheid nabij het comfortstatief aangehouden. De stralingstemperatuur die is aangehouden in het model komt overeen met de gemeten gemiddelde stralingstemperatuur van de drie zwarte bollen (zie hoofdstuk 7).

In tabel 9.1 is een overzicht weergegeven van de randvoorwaarden die ingevoerd zijn voor het verrichten van de simulaties.

Tabel 9.1: Overzicht van de ingevoerde randvoorwaarden in het simulatiemodel

Grootheid	Randvoorwaarde in simulatiemodel
Luchttemperatuur [°C]	Gemeten gemiddelde luchttemperatuur nabij comfortpaal
Relatieve luchtvochtigheid [%/100]	Gemeten gemiddelde relatieve luchtvochtigheid nabij comfortpaal
Luchtsnelheid [m/s]	Gemeten gemiddelde luchtsnelheid nabij comfortpaal
Metabolisme [met]	Voor alle proefpersonen 1,2
Kleding [I_{cl} , f_{cl} , R_{ef} , i_r]	Zie tabel 7.3
Vetpercentage	Gemiddeld vetpercentage bepaald aan de hand van de huidplooiemeting
Lichaamslengte	Gemiddeld gemeten lichaamslengte
Lichaamsgewicht	Gemeten gemiddeld lichaamsgewicht

9.2 Vergelijking simulatieresultaten en meetresultaten

Aan de hand van de in de vorige paragraaf besproken randvoorwaarden zijn voor beide meetsessies, voor elke proefpersoon apart, simulaties verricht. De resultaten hiervan zijn vergeleken met de gemeten fysiologische parameters: de gemiddelde huidtemperatuur, de kerntemperatuur en de mate van vasomotie. Daarnaast is ook aan de hand van de gesimuleerde parameters de thermische sensatie bepaald, dit is gedaan aan de hand van de regressievergelijking die binnen dit onderzoek werd opgesteld en het DTS model dat Fiala ontwikkelde. Deze resultaten zijn vervolgens vergeleken met de gemeten thermische sensatie. Tot slot werd er ook bekeken in welke mate de invoer van de individuele lichaamskenmerken een verbetering oplevert ten opzichte van het standaard model. Om deze vergelijking te kunnen maken werden beide meetsessies ook gesimuleerd met de invoer van een standaard persoon.

9.2.1 Gemiddelde huidtemperatuur

In het thermofysiologisch model wordt de huidtemperatuur berekend aan de hand van de gemiddelde huidtemperatuur over alle lichaamssegmenten, hierbij wordt het aandeel van elk lichaamssegment bepaald aan de hand van een weegfactor. Per lichaamssegment weegt elk segment mee aan de hand van de verhouding tussen de oppervlakte van het segment en de oppervlakte van het totale element. De weegfactoren zijn door Fiala vastgesteld aan de hand van een eerder verricht onderzoek [Fiala, 1998].

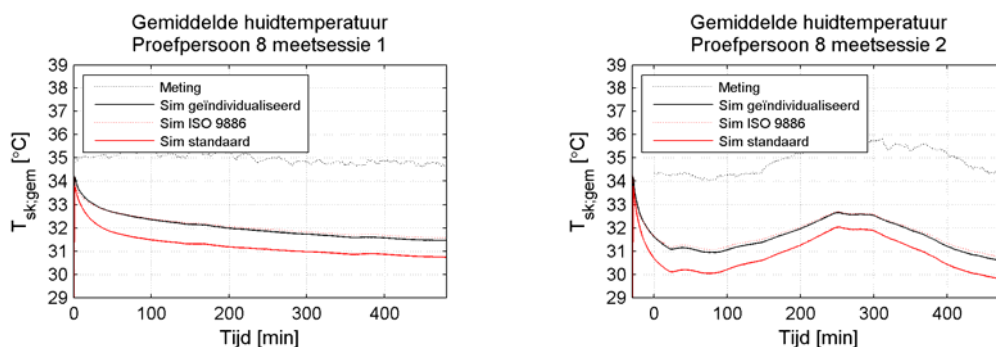
Gedurende de metingen is de gemiddelde huidtemperatuur berekend aan de hand van de 14-puntsweging uit de ISO norm 9886 (2004). In deze methode wordt gebruik gemaakt van andere weegfactoren dan de in het model gebruikte weegfactoren. Om te bepalen wat de invloed is hiervan is de gemiddelde huidtemperatuur ook berekend aan de hand van deze 14-puntsweging. In figuur 9.1 zijn de gemiddelde gemeten en gesimuleerde huidtemperaturen

weergegeven voor een karakteristieke proefpersoon (proefpersoon 8) gedurende meetsessie 1 en 2. In figuur A.60 en A.61 zijn de resultaten weergegeven voor alle proefpersonen gedurende meetsessies 1 en 2. Voor meetsessie 2 is de periode van 30 minuten voorafgaande aan het experiment, waarin de sensoren werden aangebracht en de lichaamskenmerken opgemeten werden, ook in de simulatie betrokken. Dit is gedaan omdat ruimtetemperatuur gedurende deze periode al gelijk was aan de ruimtetemperatuur die bereikt diende te worden bij de start van het experiment (17°C). Hierdoor waren de proefpersonen bij aanvang van het experiment niet meer in neutrale toestand. Uit de figuren blijkt dat de manier waarop de gemiddelde huidtemperatuur bepaald wordt nauwelijks invloed heeft op het resultaat. Voor de analyses wordt daarom gebruik gemaakt van de gemiddelde huidtemperatuur die berekend wordt door het model (over het gehele huidoppervlak).

In tabel A.19 zijn de afwijkingen tussen de simulatie- en meetresultaten weergegeven; hierin zijn zowel de gemiddelde afwijking met de bijbehorende standaarddeviatie als de root mean squared deviation (rmsd) weergegeven. De rmsd kan aan de hand van vergelijking 9.1 berekend worden; hierin is d_i het verschil tussen de gemeten en de gesimuleerde waarde voor ieder meetpunt, n representeert het aantal meetpunten [Montgomery et al, 2006].

$$rmsd = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}} \quad (9.1)$$

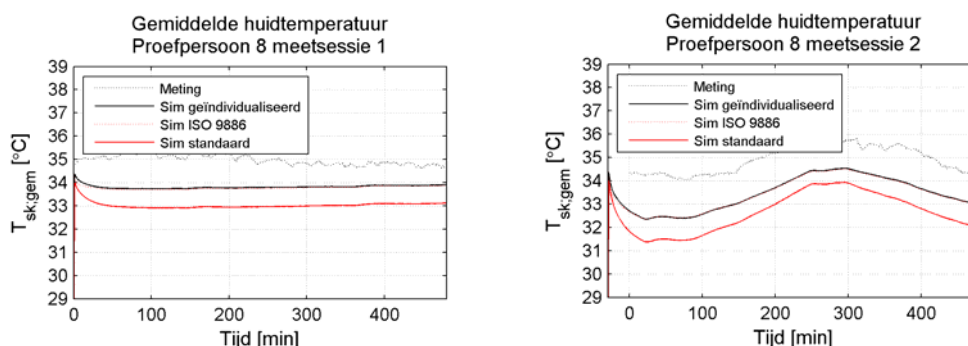
Uit de resultaten blijkt dat de gesimuleerde gemiddelde huidtemperatuur de gemeten huidtemperatuur goed volgt. Echter, de gesimuleerde gemiddelde huidtemperatuur wordt systematisch onderschat. De gemiddelde afwijking ($T_{\text{meting}} - T_{\text{simulatie}}$) voor beide meetsessies voor alle proefpersonen bedraagt $2,97 \pm 1,11^\circ\text{C}$ en de rmsd $4,49^\circ\text{C}$. Hieruit blijkt dat de gesimuleerde gemiddelde huidtemperatuur veel lager ligt dan de gemeten gemiddelde huidtemperatuur. Uit de figuren 9.1, A.60 en A.61 blijkt ook dat wanneer uitgegaan wordt van een standaard persoon de gesimuleerde gemiddelde huidtemperatuur nog lager ligt. Het invoeren van individuele lichaamskarakteristieken leidt dus wel tot een verbetering.



Figuur 9.1: Gesimuleerde en gemeten gemiddelde huidtemperaturen proefpersoon 8, meetsessies 1 (links) en 2 (rechts)

De gemeten luchtsnelheid die ingevoerd is in het model is relatief hoog (0,2 m/s). Er wordt verwacht dat de fouten die optreden ten gevolg zijn van deze hoge luchtsnelheid. Als uitgangssituatie wordt in het model een luchtsnelheid van 0,05 m/s aangehouden. Bij een lagere luchtsnelheid is het convectief warmtetransport vanaf de huid naar de omgeving kleiner; hierdoor verliest het lichaam minder warmte naar zijn omgeving. Om deze reden is er voor gekozen om de simulaties ook te verrichten met een lagere luchtsnelheid (0,05 m/s). In figuur 9.2 zijn de resultaten weergegeven van de gesimuleerde gemiddelde huidtemperatuur van proefpersoon 8 bij een luchtsnelheid van 0,05 m/s. Uit figuur 9.2 blijkt duidelijk dat de luchtsnelheid een grote invloed heeft op de gesimuleerde gemiddelde huidtemperatuur. In een eerder onderzoek bleek daarnaast ook dat de manier van invoeren van de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt een grote invloed heeft op gesimuleerde gemiddelde huidtemperatuur [Van Oeffelen, 2007]. Binnen dat onderzoek werd geconcludeerd dat, indien de warmteoverdrachtscoëfficiënt ingevoerd wordt aan de hand van de relaties van Fiala, de gemiddelde huidtemperatuur bijna 1°C lager blijkt te liggen dan wanneer de relaties worden gehanteerd die door De Dear worden aangereikt.

Indien met een lagere luchtsnelheid gesimuleerd wordt bedraagt de gemiddelde afwijking $1,14 \pm 0,10^\circ\text{C}$ en de rmsd $1,19^\circ\text{C}$. Er wordt aangenomen dat een afwijking van 1°C acceptabel is. Daarom worden de overige resultaten besproken aan de hand van deze simulatie.



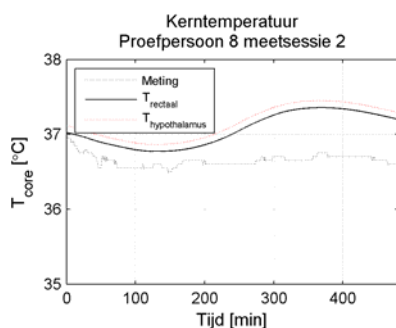
Figuur 9.2: Gesimuleerde en gemeten gemiddelde huidtemperaturen proefpersoon 8, gemiddelde huidtemperatuur eveneens bepaald aan de hand van de ISO-norm voor de individuele proefpersoon, meetsessies 1 (links) en 2 (rechts), $v_a=0,05$ m/s

Uit de resultaten blijkt verder dat de afwijkingen variëren per proefpersoon. Zo zijn de afwijkingen bij proefpersoon 1 groter dan bij de overige proefpersonen. In hoofdstuk 8 bleek al dat bij deze proefpersoon een hogere gemiddelde huidtemperatuur was gemeten dan bij de overige proefpersonen. Tussen beide meetsessies is er geen significant verschil aanwezig tussen de gemiddelde afwijking en de rmsd. Hieruit blijkt dat de fluctuerende omgevingstemperatuur goed wordt meegenomen in het model.

Uit figuur 9.2 blijkt eveneens dat de invoer van de individuele lichaamskarakteristieken een significante verbetering oplevert ten opzichte van de invoer van de lichaamskarakteristieken van een standaard persoon ($p < 0,001$).

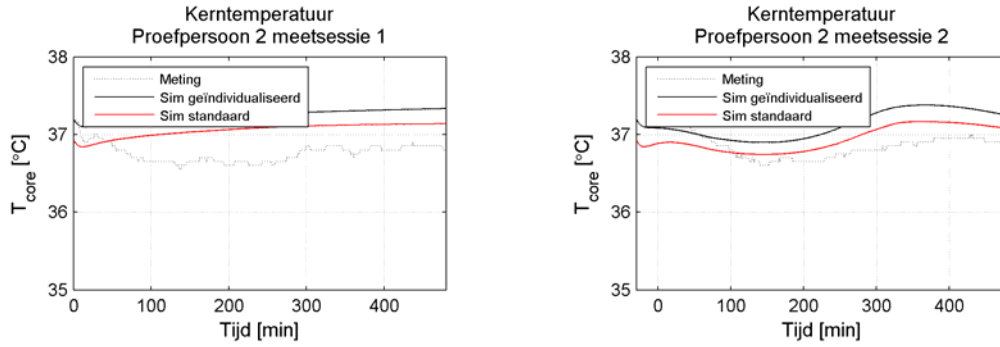
9.2.2 Kerntemperatuur

De kerntemperatuur kan op verschillende manieren worden gemeten, bijvoorbeeld rectaal, oraal, in het oor etc. Binnen dit onderzoek is de rectale temperatuur gemeten als benadering voor de kerntemperatuur. In het thermofysiologisch model wordt zowel de kerntemperatuur van het onderlichaam gesimuleerd, als de temperatuur van de hypothalamus. In figuur 9.3 zijn beide waarden en de waarde van de meting uitgezet.



Figuur 9.3: Gesimuleerde kerntemperatuur van het onderlichaam en hypothalamus proefpersoon 8 meetsessie 2

Uit deze grafiek blijkt dat de temperatuur van de hypothalamus en de temperatuur van het onderlichaam nagenoeg gelijk zijn; de temperatuur van de hypothalamus ligt iets hoger ($0,1^{\circ}\text{C}$). Voor de analyses wordt uitgegaan van de kerntemperatuur van het onderlichaam. In figuur A.64 en A.65 zijn de resultaten weergegeven voor de simulaties van de kerntemperatuur gedurende meetsessies 1 en 2. De gemiddelde afwijking bedraagt $0,19 \pm 0,51^{\circ}\text{C}$ en rmsd $0,34^{\circ}\text{C}$. Hieruit blijkt dat de gesimuleerde kerntemperatuur gemiddeld lager ligt dan de gemeten kerntemperatuur. Gedurende meetsessie 2 is een duidelijk cyclisch verloop te zien in de kerntemperatuur, dit verloop komt niet bij alle proefpersonen terug in de meting. In figuur 9.4 zijn de resultaten weergegeven van proefpersoon 2 gedurende meetsessies 1 en 2; deze proefpersoon laat wel een dergelijk verloop zien gedurende meetsessie 2. Voor alle proefpersonen geldt, met uitzondering van proefpersoon 4, dat het invoeren van de individuele lichaamskarakteristieken leidt tot een verslechtering van de gesimuleerde kerntemperatuur.



Figuur 9.4: Gesimuleerde en gemeten kerntemperatuur proefpersoon 2, meetsessies 1 (links) en 2 (rechts), $v_a=0,05$ m/s

9.2.3 Vasomotie

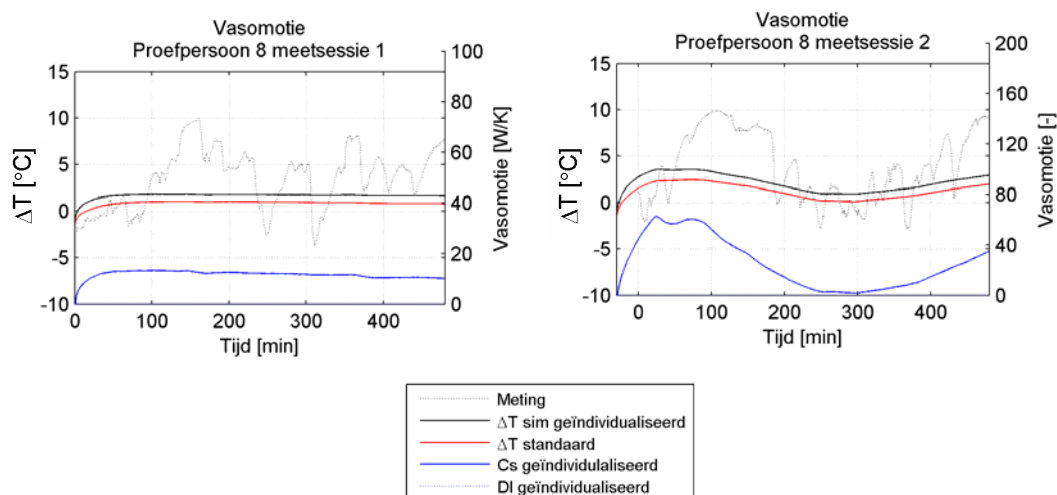
De mate van vasomotie is gedurende de meetsessies bepaald aan de hand van het temperatuurverschil tussen onderarm en vingertop en het temperatuurverschil tussen scheenbeen en teentop. In het model wordt de vasomotie berekend aan de hand van een tweetal formules: een voor vasoconstrictie (vergelijking 9.1) en een voor vasodilatatie (vergelijking 9.2).

$$Cs = 35 \cdot \left[\tanh(0,34 \cdot \Delta T_{sk;gem} + 1,07) - 1 \right] \cdot \Delta T_{sk;gem} + 3,9 \cdot \Delta T_{sk;gem} \cdot \frac{dT_{sk;gem}}{dt} \quad (9.1)$$

$$DI = 21 \cdot \left[\tanh(0,79 \cdot \Delta T_{sk;gem} - 1,46) + 1 \right] \cdot \Delta T_{sk;gem} + 32 \cdot \left[\tanh(3,29 \cdot \Delta T_{hy} - 1,46) + 1 \right] \cdot \Delta T_{hy} \quad (9.2)$$

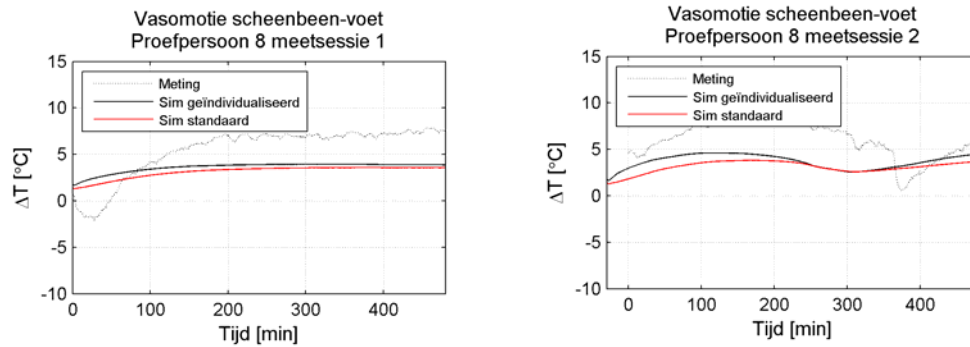
Met behulp van deze vergelijkingen kan de mate van vasoconstrictie (Cs) of vasodilatatie (DI), berekend worden. Om de simulatie- en meetresultaten met elkaar te kunnen vergelijken is ook het temperatuurverschil bepaald aan de hand van de simulaties van onderarm- en handtemperatuur, en scheenbeen- en voettemperatuur. In figuur 9.5 is de gesimuleerde vasomotie voor proefpersoon 8 gedurende meetsessies 1 en 2 weergegeven. Hieruit blijkt dat gedurende meetsessie 1 de mate van vasoconstrictie nagenoeg constant is, dit is ook te zien bij de andere proefpersonen (zie figuur A.66). Ook het gesimuleerde temperatuurverschil tussen onderarm en hand is vrijwel constant. In werkelijkheid fluctueert dit temperatuurverschil gedurende de meetsessie. Er wordt verwacht dat deze fluctuaties niet meegenomen worden in het model, omdat de persoon in het model niet beweegt terwijl dit in werkelijkheid wel het geval is. Hierdoor is de mate van vasoconstrictie en vasomotie in het model statisch, omdat de omgevingscondities niet veranderen gedurende meetsessie 1. Gedurende meetsessie 2 is er wel een variatie waar te nemen in de mate van vasoconstrictie (Cs) ten gevolge van het variërende temperatuurverloop. Eveneens blijkt dat het gesimuleerde temperatuurverschil, tussen de onderarm en hand, het werkelijke

temperatuurverschil tussen onderarm en vingertop volgt. Dit is ook waar te nemen bij de overige proefpersonen (zie figuur A.67). In de linker grafiek is daarnaast ook te zien dat er geen vasodilatatie optreedt gedurende de meetsessie; dit stemt overeen met de metingen (zie hoofdstuk 8).



Figuur 9.5: Gesimuleerde en gemeten vasomotie onderarm-vingertop proefpersoon 8, meetsessies 1 (links) en 2 (rechts), $v_a=0,05$ m/s

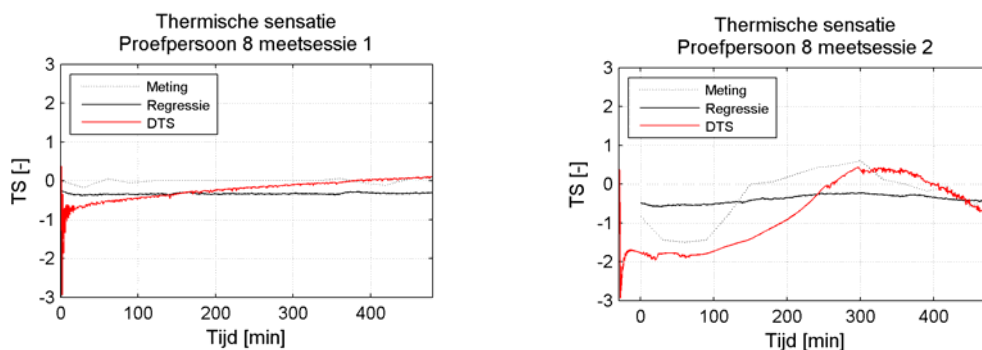
Uit de resultaten in hoofdstuk 8 bleek dat het gemeten temperatuurverschil tussen scheenbeen en teentop na ongeveer 120 minuten stabiliseerde ten gevolge van een slechte doorbloeding door het langdurig stilzitten. In figuur 9.6 is het gesimuleerde temperatuurverschil tussen scheenbeen en voet uitgezet voor proefpersoon 8. In de rechtergrafiek is eveneens waar te nemen dat het temperatuurverschil gedurende meetsessie 1 nagenoeg constant is ten gevolge van de gelijkblijvende condities. In de resultaten van meetsessie 2 blijkt dat er in het gesimuleerde temperatuurverloop een variatie aanwezig is. Deze variatie is nagenoeg gelijk aan de variatie die gevonden werd in het gesimuleerde temperatuurverloop tussen onderarm en hand. Hieruit kan afgeleid worden dat de verminderde doorbloeding ten gevolge van het langdurig stilzitten niet in het model wordt meegenomen. In figuur A.68 en A.69 zijn de resultaten voor de overige proefpersonen weergegeven.



Figuur 9.6: Gesimuleerde en gemeten vasomotie scheenbeen-teentop proefpersoon 8, meetsessies 1 (links) en 2 (rechts), $v_a=0,05$ m/s

9.2.4 Thermische sensatie

In het oorspronkelijke model van Fiala (2003) werd een vergelijking opgesteld voor het voorspellen van de dynamische thermische sensatie (DTS). In deze vergelijking wordt de DTS voorspeld aan de hand van de gemiddelde huidtemperatuur, de kerntemperatuur en de snelheid waarmee de gemiddelde huidtemperatuur verandert (zie Appendix A.12.6). De thermische sensatie die aan de hand van het DTS model voorspeld kan worden is vergeleken met de gemeten thermische sensatie. Daarnaast is de DTS ook vergeleken met de thermische sensatie die voorspeld kan worden aan de hand van het, binnen dit onderzoek opgestelde, regressiemodel met als input de gesimuleerde huidtemperaturen. In figuur 9.7 zijn de resultaten voor proefpersoon 8 gedurende beide meetsessies weergegeven.



Figuur 9.7: Gesimuleerde en gemeten thermische sensatie proefpersoon 8, meetsessies 1 (links) en 2 (rechts), $v_a=0,05$ m/s

Uit figuur 9.7 en A.70 blijkt dat de thermische sensatie gedurende meetsessie 1 redelijk goed voorspeld kan worden aan de hand van het DTS model. Proefpersoon 7 vormt hier een uitzondering op; deze persoon geeft een significant ($p>0,05$) hogere thermische sensatie aan dan de voorspelde thermische sensatie. Ook in vergelijking met de overige proefpersonen is de thermische sensatie van proefpersoon 7 gedurende meetsessie 1 significant hoger

($p > 0,05$). De gemiddelde afwijking gedurende meet sessie 1 ($T_{\text{meting}} - T_{\text{simulatie;DTS}}$) bedraagt $0,20 \pm 0,69$. De gemiddelde afwijking tussen de meting en de simulatie aan de hand van de regressieanalyse bedraagt $0,49 \pm 1,28$.

De gemiddelde afwijking tussen de meting en de DTS gedurende meet sessie 2 bedraagt $0,39 \pm 0,56$ en de gemiddelde afwijking tussen de meting en de regressieanalyse bedraagt $0,28 \pm 0,57$. De gesimuleerde thermische sensatie aan de hand van de regressieanalyse is veel gematigder dan de werkelijke thermische sensatie, en voornamelijk gedurende de koudere periodes ($T_a < 19^\circ\text{C}$) wordt de thermische sensatie sterk overschat.

9.3 Gevoeligheidsanalyse

In de voorgaande paragraaf bleek dat de huidtemperaturen die voorspeld worden met behulp van het thermofysiologisch simulatiemodel afhankelijk zijn van de luchtsnelheid, die als randvoorwaarde in het model ingevoerd wordt. Daarnaast wordt er verwacht dat het ingevoerde vetpercentage een oorzaak kan zijn van de afwijkingen die gevonden worden voor de voorspelde huidtemperaturen ten opzichte van de gemeten huidtemperaturen. Om een globale inschatting te kunnen maken, van de fout die optreedt ten gevolge van ingevoerde randvoorwaarden, is er een indicatieve gevoeligheidsanalyse verricht. Deze gevoeligheidsanalyse wordt beperkt tot de randvoorwaarde waarvan verwacht wordt dat deze een oorzaak kunnen zijn van de afwijking tussen de gemeten en voorspelde gemiddelde huidtemperatuur.

In een eerder onderzoek dat verricht werd door Van Marken Lichtenbelt et al. (2007) bleek dat zowel het invoeren van het lichaamsgewicht als het vetpercentage van de individuele proefpersoon een significante verbetering oplevert ten opzichte van de standaard persoon, voor het voorspellen van de gemiddelde huidtemperatuur. De afwijking die ten gevolge van het variëren van deze parameters ontstond lag in de orde grootte van 1,2 tot $1,5^\circ\text{C}$. In dat onderzoek bleek tevens dat de lichaamslengte slechts een kleine invloed heeft op de voorspelde gemiddelde huidtemperatuur ($0,4^\circ\text{C}$). Aan de hand van het voorgaande kan geconcludeerd worden dat het lichaamsgewicht en het vetpercentage gevoelige randvoorwaarden (inputparameters) zijn in het model. Het lichaamsgewicht is binnen dit onderzoek echter redelijk nauwkeurig bepaald, op basis hiervan wordt verwacht dat deze parameter geen significante afwijking veroorzaakt in het model. Daarnaast bleek, zoals eerder al genoemd werd, dat in dit onderzoek ook de luchtsnelheid een inputparameter is die een grote afwijking in de gemiddelde voorspelde huidtemperatuur kan veroorzaken. Er wordt verwacht dat de afwijking, die ten gevolge van de relatief hoge luchtsnelheid optreedt, ontstaat doordat de luchtlaag die aanwezig is tussen de huid en de kleding niet goed gemodelleerd wordt. De relatief hoge luchtsnelheid in combinatie met een gemiddelde clo-waarde van ongeveer 1,0 clo zorgt er waarschijnlijk voor dat de luchtsnelheid van de luchtlaag tussen de kleding en de huid sterk overschat wordt, waardoor de lokale warmteoverdrachtscoëfficiënten overschat worden en niet overeen komen met de

werkelijkheid. In vergelijking 9.2 is de vergelijking weergegeven die Fiala (1998) opstelde voor het berekenen van de lokale warmteoverdrachtscoëfficiënt ten gevolge van de kleding (U_{cl}); deze wordt berekend aan de hand van de clo-waarde van de lokale kleding (I_{cl}), de vergrotingsfactor ten gevolge van de buitenlaag van de lokale kleding (f_{cl}) en de actuele lokale coëfficiënten voor convectie en straling (respectievelijk $h_{c,mix}$ en h_r).

$$U_{cl} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m (I_{cl})_i + \frac{1}{f_{cl}(h_{c,mix} + h_r)}} \quad (9.2)$$

Uit bovenstaand vergelijking blijkt dat de warmteoverdrachtscoëfficiënt ten gevolge van de kleding afhankelijk is van de convectie warmteoverdrachtscoëfficiënt: des te groter de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt des te groter is de warmteoverdrachtscoëfficiënt ten gevolge van de kleding. In vergelijking 9.3 is de vergelijking weergegeven die door Fiala (1998) gedefinieerd werd voor het berekenen van de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt. Uit deze vergelijking blijkt dat de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt afhankelijk is van de gemiddelde lichtsnelheid (v_a).

$$h_{c,mix} = \sqrt{a_{nat} \sqrt{T_{sf} - T_a} + a_{frc} \cdot v_a + a_{mix}} \quad (9.3)$$

Uit het voorgaande blijkt dat de fout die optreedt tussen de gesimuleerde en gemeten gemiddelde huidtemperatuur ook veroorzaakt kan worden door de warmteoverdrachtscoëfficiënt ten gevolge van de kleding. Deze fout kan gecompenseerd worden door zowel de lichtsnelheid te verlagen (zoals in paragraaf 9.2 besproken werd) als door het verhogen van de thermische weerstand van de kleding; daarom wordt ook deze parameter betrokken in de gevoeligheidsanalyse.

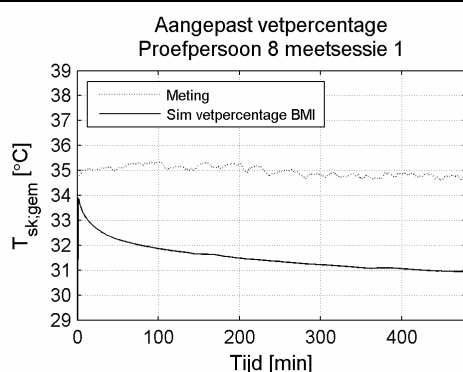
De gevoeligheidsanalyse die verricht werd omvatte de volgende parameters die gevarieerd werden: de gemiddelde lichtsnelheid, het vetpercentage en de kledingweerstand. De overige parameters werden gelijk gehouden. Omdat het om een indicatieve analyse gaat werd er slechts voor één proefpersoon (proefpersoon 8) bekeken in welke mate de verschillende parameters een invloed hebben op de afwijking die optreedt tussen de gemeten en voorspelde gemiddelde huidtemperatuur.

Gemiddelde lichtsnelheid

In de voorgaande paragraaf bleek dat de gemiddelde lichtsnelheid een grote invloed heeft op gemiddelde huidtemperatuur. De gemiddelde huidtemperatuur werd voorspeld aan de hand van de gemeten gemiddelde lichtsnelheid van 0,20 m/s en op basis van de uitgangssituatie in het model (0,05 m/s). Hieruit bleek dat de gemiddelde afwijking tussen de gemeten en voorspelde gemiddelde huidtemperatuur verbeterde in de orde grootte van 1,83°C.

Vetpercentage

In paragraaf 9.1.1 werd al aangehaald dat het gemeten vetpercentage aan de hand van de huidplooiemeting een vertekend beeld kan geven ten opzichte van de werkelijkheid. Daarnaast blijkt aan de hand van de lichaamskenmerken van de proefpersonen dat er een groot verschil bestaat tussen het vetpercentage dat aan de hand van de huidplooiemeting verricht wordt en het vetpercentage dat aan de hand van de BMI bepaald wordt. Er wordt verwacht dat de BMI geen goede indicatie is voor het vetpercentage. Bij het bepalen van de BMI wordt namelijk geen onderscheid gemaakt in vet- en spiermassa, waardoor de spiermassa meegenomen wordt in het bepalen van het vetpercentage. Om te onderzoeken wat de invloed is van het vetpercentage op de gesimuleerde gemiddelde huidtemperatuur is het vetpercentage dat op basis van de BMI bepaald is, ingevoerd als randvoorwaarde in het simulatiemodel. In figuur 9.8 zijn de resultaten weergegeven voor proefpersoon 8 gedurende meetsessie 1, de gemiddelde luchtsnelheid kwam overeen met de gemeten gemiddelde luchtsnelheid (ongeveer 0,20 m/s). De gemiddelde afwijking (voor proefpersoon 8) bedraagt in dit geval $3,51 \pm 1,50^\circ\text{C}$. In de simulatie met de het vetpercentage aan de hand van de huidplooiemeting bedroeg deze afwijking $3,02 \pm 1,51^\circ\text{C}$ (zie Appendix 12.1). Hieruit blijkt dat het vetpercentage van invloed is op de gemiddelde voorspelde huidtemperatuur. Echter, deze invloed is relatief klein als er bedacht wordt dat het verschil in vetpercentage 7,4% bedraagt (vet% BMI bedraagt 18,4%, vet% huidplooiemeting bedraagt 11,0%). Uit het voorgaande kan geconcludeerd worden dat binnen dit onderzoek het vetpercentage geen gevoelige parameters en geen grote afwijking veroorzaakt tussen de gemeten en voorspelde gemiddelde huidtemperatuur.

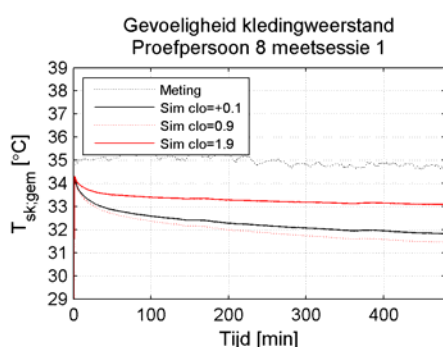


Figuur 9.8: Voorspelde gemiddelde huidtemperatuur met vetpercentage aan de hand van BMI, proefpersoon 8 meetsessie 1

Thermische kledingweerstand

Uit vergelijking 9.2 blijkt dat de warmteoverdrachtscoëfficiënt ten gevolge van de kleding onder andere afhankelijk is van de thermische weerstand van de kleding (clo-waarde). Om de afwijking te compenseren die ontstaat ten gevolge van de relatief hoge gemeten gemiddelde luchtsnelheid kan naast het verlagen van de gemiddelde luchtsnelheid ook de thermische

weerstand van de kleding aangepast worden. Daarnaast speelt ook een rol dat de thermische weerstand van de kleding geschat is aan de hand van waarden die in de norm genoemd worden. Om te onderzoeken wat de invloed is van de thermische kledingweerstand zijn er twee aanvullende simulaties verricht (eveneens voor proefpersoon 8 gedurende meetsessie 1): voor de eerste simulatie is de kledingweerstand verdubbeld naar ongeveer 1,9 clo, voor de tweede simulatie is de kledingweerstand verhoogd met 0,1 clo. Deze laatste simulatie werd verricht om te bepalen of de onnauwkeurigheid, die ontstaat ten gevolge van het schatten van de kledingweerstand, een grote invloed heeft op de gesimuleerde gemiddelde huidtemperatuur. Beide simulaties zijn verricht met als randvoorwaarde de gemeten gemiddelde luchtsnelheid (0,20 m/s). In figuur 9.9 zijn de resultaten van deze simulaties weergegeven. Uit deze figuur blijkt dat het verdubbelen van de kledingweerstand een grote invloed heeft op de gemiddelde voorspelde huidtemperatuur. De gemiddelde afwijking tussen de gemeten en de voorspelde gemiddelde huidtemperatuur bedraagt in dit geval $1,7 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$. Het verhogen van de kledingweerstand met 0,1 clo heeft geen groot effect op de gesimuleerde gemiddelde huidtemperatuur (de gemiddelde huidtemperatuur ligt gemiddeld $0,30^{\circ}\text{C}$ hoger). Hieruit kan afgeleid worden dat de onzekerheid, die ontstaat bij het bepalen van de kledingweerstand, een kleine invloed heeft op de voorspelde gemiddelde huidtemperatuur.



Figuur 9.9: Voorspelde gemiddelde huidtemperatuur bij verschillende thermische kledingweerstand proefpersoon meetsessie 1

Uit het voorgaande kan geconcludeerd worden dat, van de onderzochte parameters, de luchtsnelheid en een grote verandering in de thermische weerstand van de kleding een duidelijk effect hebben op de voorspelde gemiddelde huidtemperatuur. Daarnaast bleek dat de onzekerheid in het bepaalde vetpercentage en de kledingweerstand nauwelijks invloed hebben op de voorspelde gemiddelde huidtemperatuur.

Deel E

Conclusies

10. Conclusies en discussie

In dit hoofdstuk worden de verschillende onderzoeksvragen beantwoord die aan het begin van het onderzoek geformuleerd zijn (zie paragraaf 1.5). Daarnaast worden ook de aanvullende conclusies besproken die aan de hand van dit onderzoek naar voren zijn gekomen.

Het hoofddoel binnen dit onderzoek was om te onderzoeken wat de invloed is van een variërend temperatuurverloop op de fysiologische reponses, het thermisch comfort, de productiviteit en de prestatie van gebruikers. Om dit te onderzoeken werden er metingen verricht onder laboratoriumcondities aan, en met behulp van, proefpersonen. Het variërende temperatuurverloop werd hierbij benaderd door een lineaire functie van de tijd. De temperatuurgrenzen die werden onderzocht vielen binnen de comfortgrenzen, de maximale temperatuur die werd bereikt bedroeg 25°C en de minimale temperatuur bedroeg 17°C. Daarnaast nam iedere proefpersoon deel aan een controle sessie, deze sessie was op eenzelfde wijze opgebouwd als de experimentele meetsessie met als verschil dat de ruimtetemperatuur gedurende deze sessie op een constant niveau bleef van 21,5°C (PMV=0). Op deze manier was het mogelijk om vast te stellen of eventuele effecten die gevonden werden te herleiden waren naar de ruimtetemperatuur, of dat deze effecten voortkwamen uit de tijdsduur van de meetsessie.

Allereerst zal er ingegaan worden op de fysiologische responses en het thermisch comfort ten gevolge van het variërend temperatuurverloop.

10.1 Invloed van variërend temperatuurverloop op fysiologische responses en thermisch comfort

Aan de hand van de resultaten kan geconcludeerd worden dat de temperatuurveranderingen waarneembaar zijn door de proefpersonen. Er blijkt een duidelijke relatie te bestaan tussen de gemeten gemiddelde huidtemperatuur en de thermische sensatie van de proefpersonen. Echter, ook de ruimtetemperatuur is van significante invloed op het thermisch comfort. Met behulp van een meervoudige regressieanalyse is vastgesteld dat de gemiddelde huidtemperatuur en de ruimtetemperatuur beide bepalend zijn voor de thermische sensatie. Het meervoudige regressiemodel dat werd opgesteld laat binnen dit onderzoek een duidelijke overeenkomst zien met het PMV model dat door Fanger werd opgesteld. Hieruit blijkt dat de conclusies die in eerdere onderzoeken werden getrokken, dat het PMV model niet bruikbaar is in situaties die dynamisch zijn, niet altijd geldig zijn. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat dit onderzoek werd verricht onder laboratoriumcondities; waardoor de beleving van de personen beïnvloed kan worden. Daarnaast is ook de toegepaste temperatuurrange beperkt. Voorafgaande aan het onderzoek werd ook verwacht dat de mate van vasomotie (vaatvernauwing en vaatverwijding) van invloed zou zijn op de thermische sensatie van de

proefpersonen. Echter, op basis van de resultaten die binnen dit onderzoek verkregen werden kan geconcludeerd worden dat dit binnen dit onderzoek niet het geval is.

Daarnaast werd geconcludeerd dat de doorbloeding naar de voeten belemmerd werd ten gevolge van het langdurig stilzitten, ondanks het verrichten van oefeningen ten behoeve van de doorbloeding. Hierdoor stabiliseerde het temperatuurverschil tussen scheenbeen en voet na ongeveer 120 minuten, waardoor dit temperatuurverschil geen goede maat is voor de vasomotie.

Tevens kan geconcludeerd worden dat het variërend temperatuurverloop niet leidt tot onacceptabele situaties. Uit de metingen blijkt dat de proefpersonen zich gedurende meet sessie 1 (constante temperatuur) licht comfortabel tot comfortabel voelen. Gedurende meet sessie 2 voelen de proefpersonen zich voornamelijk aan het begin en aan het einde van de meet sessie licht oncomfortabel tot oncomfortabel. Echter, als gekeken wordt naar de aanvaardbaarheid van deze condities, dan blijkt dat de proefpersonen over het algemeen de situatie acceptabel vinden. In het onderzoek dat Kolarik (2005) verrichtte werd eveneens geconcludeerd dat een dergelijk temperatuurverloop een invloed heeft op de thermische sensatie. Daarnaast werd binnen dit onderzoek ook geconcludeerd dat de aanwezigheid van SBS symptomen groter was aan het einde van het experiment. Aan de hand van de resultaten binnen dit onderzoek kan dezelfde conclusie worden getrokken: in het tweede gedeelte van de meet sessie worden vaker SBS symptomen gemeld, dan in het eerste gedeelte van de meet sessie. Dit verschil werd echter niet significant bevonden ($p > 0,05$). Daarnaast kwam naar voren dat slaperigheid gedurende meet sessie 1 het meest gemeld werd en gedurende meet sessie 2 werd hoofdpijn het meest gerapporteerd. Deze verschillen zijn echter zeer gering, er bestaat dan ook geen aanleiding om aan te nemen dat dit verschil veroorzaakt wordt door het type meet sessie.

10.2 Invloed van variërend temperatuurverloop op prestatie en productiviteit

Binnen het onderzoek werden er twee typen taken verricht: een rekentaak en een teksttaak. De productiviteit werd vastgesteld door respectievelijk het aantal gemaakte sommen per keer en het aantal getypte karakters per minuut. De prestatie werd bepaald aan de hand van het percentage correcte sommen per keer en het aantal correcte karakters per minuut. Om de data van de verschillende proefpersonen met elkaar te kunnen vergelijken werden vooraf aan de analyse de data genormaliseerd (zie paragraaf 8.4.1).

Rekentaak

Uit de resultaten blijkt dat er geen significante relatie bestaat tussen het aantal gemaakte sommen, het aantal correcte sommen en de ruimtetemperatuur. Ook tussen de beide delen van de meet sessie en de meet sessies onderling werd geen significant verschil gevonden.

Uit de resultaten bleek dat de proefpersonen gedurende de gehele meet sessies bijna maximaal scoorden. Hierdoor zijn de verschillen die optreden zeer gering en moeilijk waar te nemen. Als conclusie kan gesteld worden dat de rekentaken te eenvoudig waren voor deze proefpersonengroep. In eerder onderzoek dat verricht werd door Fang et al. (2004) werden eveneens dergelijke hoge scores gevonden. Hier werd geconcludeerd dat de proefpersonen waarschijnlijk te gemotiveerd waren tijdens het experiment, waardoor zij het effect van een oncomfortabele omgeving vereffenden en de prestatie gelijk bleef. In dit onderzoek zou dit ook een mogelijke verklaring kunnen zijn voor het uitblijven van de effecten van de temperatuur.

Tekstaak

Door een fout in de webapplicatie konden slechts de eerste vier regels van elke getypte tekst opgeslagen worden in de database. Hierdoor kon de analyse slechts over een klein gedeelte verricht worden, waardoor er waarschijnlijk een vertekend beeld is ontstaan. Uit de analyse bleek dat er geen effect van de temperatuur was op het aantal getypte karakters per minuut en het aantal goede karakters per minuut. Ook hier werden bij alle proefpersonen scores gevonden die nabij de maximale score liggen.

10.3 Voorspelling thermische sensatie met behulp van een thermofysiologisch model

Binnen dit onderzoek werd voor het voorspellen van de thermische sensatie, aan de hand van een thermofysiologisch model, gebruik gemaakt van het model dat ontwikkeld is bij de faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven in samenwerking met de Universiteit van Maastricht. Om een goede voorspelling te geven van het thermisch comfort is het van belang dat de fysiologische responses van het lichaam goed gesimuleerd worden. In het navolgende zal er allereerst ingegaan worden op het voorspellen van de fysiologische responses.

Fysiologische responses

Aan de hand van eerder verrichte onderzoeken bleek dat met behulp van het model de huid- en kerntemperaturen redelijk goed voorspeld kunnen worden [Van Markenlichtenbelt et al.(2004) en (2007)]. Ook de invoer van individuele lichaamskenmerken leidt tot een grote verbetering van de voorspelling ten opzichte van de voorspellingen aan de hand van een standaard persoon (zie paragraaf 4.4).

Na simulatie met de gemeten omgevingsparameters bleek dat de gesimuleerde gemiddelde huidtemperatuur systematisch onderschat werd ten opzichte van de gemeten gemiddelde huidtemperatuur. Doordat de luchtsnelheid die gemeten werd tijdens de meetsessie relatief hoog was (0,20 m/s) ten opzichte van de uitgangssituatie in het model (0,05 m/s) werd er verwacht dat de oorzaak van de lage gemiddelde huidtemperaturen hier aan te wijten was. Daarom werd er voor gekozen om de simulaties ook te verrichten aan de hand van de luchtsnelheid die in het model als uitgangssituatie wordt aangehouden. Uit de resultaten van deze simulaties blijkt dat indien met een lagere luchtsnelheid gesimuleerd wordt de gemiddelde afwijking $1,14 \pm 0,10^{\circ}\text{C}$ en de rmsd $1,19^{\circ}\text{C}$ bedraagt. Ook blijkt dat de invoer van de individuele lichaamskarakteristieken een significante verbetering oplevert voor de gemiddelde gesimuleerde huidtemperatuur ten opzichte van de invoer van de lichaamskarakteristieken van een standaard persoon ($p < 0,001$).

Uit simulaties van de kerntemperatuur blijkt dat de gesimuleerde kerntemperatuur gemiddeld lager ligt dan de gemeten kerntemperatuur. Gedurende de simulaties van meetsessie 2 is een duidelijk cyclisch verloop te zien in de kerntemperatuur, dit verloop komt niet bij alle proefpersonen terug in de meting. Voor bijna alle proefpersonen geldt dat het invoeren van de individuele lichaamskarakteristieken leidt tot een verslechtering van de gesimuleerde kerntemperatuur.

Het temperatuurverschil tussen onderarm en hand, dat gesimuleerd werd gedurende meetsessie 1, bleek vrijwel constant te zijn. Echter, in werkelijkheid fluctueert dit temperatuurverschil gedurende de meetsessie. Er wordt verwacht dat deze fluctuaties niet meegenomen worden in het model. Gedurende meetsessie 2 is er wel een variatie waar te nemen in het gesimuleerde temperatuurverschil tussen onderarm en voet ten gevolge van het variërende temperatuurverloop. Eveneens blijkt dat het gesimuleerde temperatuurverschil het werkelijke temperatuurverschil tussen volgt.

Het verloop van het temperatuurverschil tussen scheenbeen en voet vertoonde eenzelfde verloop als het temperatuurverschil tussen onderarm en voet. Dit kan veroorzaakt worden doordat de verminderde doorbloeding, ten gevolge van het langdurig stilzitten, niet in het model wordt meegenomen.

Thermisch comfort

In het oorspronkelijke model van Fiala (2003) kan de thermische sensatie voorspeld worden aan de hand van de gemiddelde huidtemperatuur, de kerntemperatuur en de snelheid waarmee de gemiddelde huidtemperatuur verandert. Uit een vergelijking met de meetresultaten is gebleken dat de thermische sensatie gedurende meetsessie 1 redelijk goed voorspeld kan worden aan de hand van het DTS model. De gemiddelde afwijking gedurende meetsessie 1 bedraagt $0,20 \pm 0,69$. De gemiddelde afwijking tussen de meting en de DTS gedurende meetsessie 2 bedraagt $0,39 \pm 0,56$. Hieruit blijkt dat gedurende meetsessie 2, wanneer de omgevingstemperatuur varieert, de thermische sensatie nog steeds redelijk voorspeld kan worden. Daarnaast werd ook de thermische sensatie voorspeld aan de hand van de

regressievergelijking die binnen dit onderzoek werd opgesteld met als input de voorspelde gemiddelde huidtemperatuur en de gemeten ruimtetemperatuur. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de gesimuleerde thermische sensatie aan de hand van de regressieanalyse veel gematigder is dan de werkelijke thermische sensatie, en voornamelijk gedurende de koudere periodes ($T_a < 19^\circ\text{C}$) wordt de thermische sensatie sterk overschat.

Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat deze resultaten verkregen zijn aan de hand van de simulaties met een lage luchtsnelheid.

11. Aanbevelingen

Naar aanleiding van de resultaten die verkregen werden binnen dit onderzoek worden er een aantal aanbevelingen gedaan waar rekening mee gehouden dient te worden in een eventueel vervolgonderzoek.

11.1 Vervolgonderzoek

In dit onderzoek kwam naar voren dat het toepassen van een lineaire temperatuurtoename gedurende de eerste helft van de dag en een lineaire temperatuurafname gedurende de tweede helft van de dag geen negatief effect heeft op de acceptabelheid van de omgeving. Echter omdat het onderzoek uitgevoerd is onder laboratoriumcondities kan er niet zo maar worden aangenomen dat dit ook geldig is voor een praktijksituatie. Daarom is het noodzakelijk om een dergelijk experiment ook in een praktijksituatie te verrichten.

Daarnaast hebben aan het onderzoek een geringe groep proefpersonen deelgenomen. Voor vervolgonderzoek is het van belang dat ook de effecten worden bekeken voor een grotere groep personen. Tevens is het belangrijk dat de groep proefpersonen gevarieerder is, oudere personen en vrouwen blijken vaak gevoeliger te zijn voor temperatuurveranderingen.

Tevens kwam naar voren dat de proefpersonen gedurende het beantwoorden van de vragen omtrent de thermische sensatie niet altijd een sensatie aangeven die overeenkomt met de daadwerkelijke situatie. Soms denken proefpersonen dat ze iets moeten voelen omdat ze verwachten dat de omgeving verandert. In dit onderzoek werd dit effect duidelijk terug gezien in de thermische sensatie die gemeten werd gedurende meetsessie 1. Indien er voor gekozen wordt om een controle meetsessie in de opzet van het experiment te betrekken, dan dient overwogen te worden of dit ook bekend gemaakt moet worden aan de proefpersonen.

De productiviteits- en prestatietaken die binnen dit onderzoek gebruikt zijn bleken achteraf te eenvoudig te zijn voor de proefpersonen die hebben deelgenomen aan dit onderzoek. Indien aan de hand van dergelijke testen de productiviteit en prestatie vastgesteld wordt, is het van belang dat de testen niet te eenvoudig zijn. Door ervoor te zorgen dat deze niet te eenvoudig zijn wordt er verwacht dat er scores gerealiseerd worden die niet allemaal nabij de maximale score liggen.

11.2 Thermofysiologisch model

Binnen dit onderzoek kwam naar voren dat de relatief hoge luchtsnelheid (de luchtsnelheid ligt wel nog binnen de comfortgrenzen) niet goed meegenomen wordt in het model. In een eerder onderzoek bleek dat de relaties voor de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt die worden gehanteerd in het model zeer bepalend zijn voor de gesimuleerde gemiddelde huidtemperatuur. Voor vervolgonderzoek is het van belang dat de invloed hiervan onderzocht wordt, en dat het model aangepast wordt zodat ook de effecten van hogere luchtsnelheden goed meegenomen worden.

Daarnaast bleek dat de verminderde doorbloeding, ten gevolge van het langdurig stil zitten, niet wordt meegenomen in het model. In de toekomst zou het model op dit gebied uitgebreid kunnen worden.

Tot slot is het van belang om voor alle randvoorwaarden die in het model ingevoerd kunnen worden een uitgebreide gevoeligheidsanalyse te verrichten, ten behoeve van het bepalen van de invloed van de verschillende invoerparameters.

Literatuurlijst

Andersen I. et al. (1974). Human response to 78-hour exposure to dry air. *Archive for Environmental Health*, vol. 29, pp. 319-324.

Andersson L.O. et al. (1975). Human responses to dry, humidified and intermittently humidified air in large office buildings. *Swedish Building Research D11*, Stockholm.

Arens E., Zang H. (2006). The skin's role in human thermoregulation and comfort. Thermal and moisture transport in fibrous materials, eds N. Pan and P. Gibson, Woodhead Publishing Ltd, pp 560-602.

ASHRAE (1997). *ASHRAE Handbook of Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA.

Baarda D.B., Goede M.P.M. de, Kalmijn M. (2000). *Enquêteren en gestructureerd interviewen*. Wolters-Noordhoff bv, 1^e druk, Groningen.

Benziger T.H. (1963). Peripheral cold- and central warm-reception, main origins of human thermal discomfort. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 49, pp. 832-839

Berglund L.G., Gonzalez R.R. (1978a). Occupant acceptability of eight-hour-long temperature ramps in the summer at low and high humidities. *ASHRAE Transactions*, vol. 84 part 2, pp. 278-284.

Berglund, L.G., Gonzalez, R.R. (1978b). Application of acceptable temperature drifts to built environments as a mode of energy conservation. *ASHRAE Transactions*, vol. 84 part 1, pp. 110-121.

Bligh, J. (1985). Regulation of body temperature in man and other mammals, in A. Shitzer and R.C. Eberhart (Eds). *Heat Transfer in Medicine and Biology – Analysis and Applications*, vol. 1, pp. 15-52.

Boray P.F., Gifford R. en Rosenblood L., (1989). Effects of warm white, cool white and full-spectrum fluorescent lighting on simple cognitive performance, mood and ratings of others. *Journal of Environmental Psychology*, vol. 9, pp. 297-308.

Bluyssen P.M. Oliveira Fernandes E. de, Fanger P.O., Groes L., Clausen G., Roulet C.A., Bernard C.A., Valbjorn O. (1995). European audit project to optimize indoor air quality and energy consumption in office buildings. TNO bouw, Delft.

Bluyssen M. (2001). *Airless study, publishable final report*. TNO Building and Construction Research, Contract JOR3-CT97-0171.

Buijs A. (2003). *Statistiek om mee te werken*. Stenfert Kroese, Wolters-Noordhoff bv, 7^e druk, Groningen.

Cleemments-Croome D.I. (2006). *Creating the productive workplace*. Taylor en Francis Group, 2^e druk, Londen.

Cox C., Bluysen P.M., Roulet C.A. et al. (2002). Health Optimisation Protocol for Energy-efficient buildings (HOPE). TNO Bouw, Delft.

Dear, R.J. de, Brager, G. (1998). Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. ASHRAE Transactions, vol.104 part 1, pp. 145–167.

Dear, R. de, Brager, G.S. (2001). The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. International Journal of Biometeorology, vol. 45, pp. 100–108.

Donnini, G., Molina, J., Martello, C. Lai, D.H.C., Lai, H.K., Chang, C.Y., Laflamme, M., Nguyen, H. van., Haghighat, F. (1997). Field study of occupant comfort and office thermal environments in a cold climate. ASHRAE Transactions, vol. 103, pp. 205–220.

Durnin, J.V.G.A., Rahaman, M.M. (1967). The assesment of the amount of fat in the human body from measurements of skinfold thickness. British Journal of Nutrition, vol. 21, pp. 681-689.

Durnin J.V.G.A., Womersley J. (1974). Body fat assessed from total body density and its estimation from skinfold thickness: measurements on 481 men and women aged from 16 to 72 years. The British Journal of Nutrition, vol. 32, pp. 77-97.

Fang L., Wyon D.P., Fanger P.O. (2003). Sick Building Syndrome symptoms caused by low humidity. In Proceedings Healthy Buildings 2003, Singapore, Healthy Buildings 2003, vol. 3, pp. 1-6.

Fang, L., Wyon, D.P., Clausen, G., Fanger, P.O. (2004). Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality, SBS symptoms and performance. Indoor Air, vol. 14, pp. 74-81.

Fanger P.O. (1910). Thermal comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering. Technical University of Denmark, Laboratory of Heating and Airconditioning, Copenhagen: Danish Technical Press.

Fanger P.O. (2001). Human requirements in future air-conditioned environments. International Journal of Refrigeration, vol. 24, pp. 148-153.

Fiala, D. (-). Coupling dynamic thermal simulation of buildings and humans. Presentatie, Institute of Energy and Sustainable Development, De Montfort University, Leicester, UK.

Fiala D. (1998). Dynamicsche Simulation des menschlichen Wärmehaushalts und der thermischen behaglichkeit. PhD thesis, De Montfort University Leicester, UK.

Fiala, D., Lomas, K.J., Martinez, D., Cook, M.J.. (1999). Dynamic thermal sensation in PDEC buildings. In Proceedings PLEA 1999, Brisbane, vol. 99 (1), pp. 243-248.

Fiala D., Lomas, K.J., Stohrer M. (2001). Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. International Journal of Biometeorology, vol. 45, pp. 143-159.

Frijns, A.J.H., Limpens-Neilen, D., Schoffelen, M.E.A., Leeuwen, G.M.J. van. (-). Simulations of the Human Thermal Response to Local Heating. In Conference paper on CD, IEA2006 conference (International Ergonomics Association), Maastricht, The Netherlands.

Gagge A.P. (1967). Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environmental research*, vol. 1, pp. 1-20.

Griffiths, I.D., McIntyre, D.A. (1974). Sensitivity to temporal variations in thermal conditions. *Ergonomics*, vol. 17 (4), pp. 499-507.

Hardy, J.G., Du Bois, E.F. (1940). Differences between men and women in their response to heat and cold. In *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, vol. 26, pp. 389-398.

Hardy J.D. (1970). Thermal comfort: skin temperature and physiological thermoregulation, in Hardy J.D., Gagge A.P., Stolwijk J.A.J. (1970). *Physiological and behavioral temperature regulation*, Charles C., Thomas Publishers, USA.

Hensen, J.L.M. (1999). Literature review on thermal comfort in transient conditions. *Building and Environment*, vol. 25, pp. 309–316.

Heschong Mahone Group. (1999). *Daylighting in schools: An investigation into the relationship between daylighting and human performance*. Heschong Mahone Group, VS.

Heschong Mahone Group. (2003). *Windows and classrooms: A study of student performance and the indoor environment*. California Energy Commission, VS.

Holmér I. (2004). Cold but comfortable? Application of comfort criteria to cold environments. *Indoor Air*, vol. 14 supplement 7, pp. 27-31.

Huizenga C., Zhang H., Duan T., Arens E. (1999). An improved multinode model of human physiology and thermal comfort. *Proceedings of Building Simulation '99. IBPSA*

Huizenga C., Zhang H., Arens, E. (2001). A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments. *Building and Environment*, vol. 36, pp. 691-699.

Humphreys M.A., Michael A., Nicol J.F. (2000). Outdoor temperature and indoor thermal comfort: raising the precision of the relationship for the 1998 ASHRAE database of field studies. *ASHRAE Transactions*, vol. 106, pp. 485-492.

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

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*. International Standards Organization, Geneva.

ISO 9886 (2004). *Ergonomics – Evaluation of thermal strain by physiological measurements*. International Standards Organization, Geneva.

ISO 10551 (1995). Ergonomics of the thermal environment – Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales. International Standards Organization, Geneva.

Jaakkola, J.J.K., Heinonen, O.P., Seppänen, O. (1991). Mechanical ventilation in office buildings and the sick building syndrome. An experimental and epidemiological study. *Indoor air*, vol. 2, pp. 111-121.

Kahl, J.K. (2005). Room Temperature and Task Effects on Arousal, Comfort and Performance. In *UW-L Journal of Undergraduate Research VIII*.

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.

Kolarik J., Olesen B.W., Toftum J., Mattaralo L. (2007). Thermal comfort, Perceived Air Quality and Intensity of SBS symptoms during exposure to moderate operative temperature ramps. Nog niet gepubliceerd.

Kosonen, R., Tan, F. (2004). Assessment of productivity loss in air-conditioned buildings using PMV index. *Energy and Buildings*, vol.36, pp. 987-993.

Kurvers, K., Linden, K. van der, Boerstra, A. (2002). Individuele beïnvloeding: lager energiegebruik, gezonder, comfortabeler en productiever binnenmilieu. *Verwarming en Ventilatie*, vol. 59 (6), pp. 485-489.

Lagercrantz L. et al. (2003). Objective and subjective responses to low relative humidity in an office intervention study. In *Proceedings Healthy Buildings 2003, Singapore, Healthy Buildings 2003*, vol. 3, pp. 163-168.

Lantner A., Svanekiaer H. (2005). Temperature effect on performance. Master thesis, International Centre for Indoor Environment and Energy, Technical University of Denmark.

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.

Lohman T.G., Roche A.F., Martorell R. (1988). Anthropometric standardization reference manual. Human Kinetics Book, Champaign, IL.

Limpens-Neilen, D., Schoffelen, M.E.A., Rissanen, S., Schellen, H.L. (-). Thermal comfort of churchgoers in an experimental set-up of a cold church with a local heating system. In *Conference paper on CD of the IEA2006 conference (International Ergonomics Association)*, Maastricht, The Netherlands.

Leijten J.L. (2006a). 20 jaar veldonderzoek in kantoorgebouwen. *Facility Management jaarboek 2006*, pp. 58-60.

Leijten J.L., Kurvers S.R. (2006b). Robustness of buildings and HVAC systems as a hypothetical construct explaining differences in building related health and comfort symptoms and complaint rates. *Energy and Buildings*, vol. 38, pp. 701-707.

Loomans, M.G.L.C. (1998). The measurement and simulation of indoor air flow. PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven.

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*, vol. 37, pp. 153-163.

Marken Lichtenbelt, W.D. van, 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.

Marken Lichtenbelt W.D., Frijns A.J.H., Fiala D., Janssen F.E.M., Ooijen A.M.J., Steenhoven A.A. (2004). *Journal of Thermal Biology*, vol. 29, pp. 577-591.

Marken Lichtenbelt, W.D., van, Frijns, A.J.H., Ooijen, M.J., van, Fiala, D., Kester, A.M., Steenhoven, A.A., van (2007). Validation of an individualized model of human thermoregulation for predicting responses to cold air. *International Journal of Biometeorology*, vol.51, pp. 169-179.

Martinez, D., Fiala, D., Cook, M.J., Lomas, K.J. (2000). Predicted comfort envelopes for office buildings with passive draught evaporative cooling. In *Proceeding RoomVent 2000 Conference*, vol.1, Reading, pp. 53-8.

McCartney K.J., Nicol J.F. (2002). Developing an adaptive control algorithm for Europe: Results of the SCAT's project. *Energy and Buildings*, vol. 34 issue 9, pp. 623-635.

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 by chairs. *ASHRAE Transactions*, vol. 100, pp. 795-802.

Melikov, A., Pitchurov, G., Naydenov, K., Langkilde, G. (2005). Field study on occupant comfort and the office thermal environment in rooms with displacement ventilation. *Indoor air*, vol. 15, pp. 205-214.

Mendell M.J. (1993). Non-specific symptoms in office workers: a review and summary of the epidemiological literature. *Indoor Air*, vol. 3, pp. 227-236.

Mendell M.J., Heath G.A. (2005). Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air*, vol. 15, pp. 27-52.

Milton D.K., Glencross P.M., Walters M.D. (2000). Risk of sick leave associated with outdoor air supply, humidification, and occupant complaints. *Indoor Air*, vol. 10, pp. 212-221.

Montgomery D.C., Runger G.C., Hubele N.F. (2004). *Engineering statistics*. 3rd edition, John Wiley and Sons Inc., New York.

Nagano, K., Takaki, A., Hirakawa, M., Tochiara, Y. (2005). Effects of ambient temperature steps on thermal comfort requirements. *International Journal of Biometeorology*, vol. 50, pp. 33-39.

Nagashima, K., Yoda, T., Yagishita, T., Taniguchi, A., Takayoshi, H., Kanosue, H. (2002). Thermal regulation and comfort during a mild-cold exposure in young Japanese women complaining of unusual coldness. *Journal of Applied Physiology*, vol. 92, pp. 1029-1035.

Nicol F., Humphreys M., Sykes O., Roaf S. (1995). *Standards for thermal comfort*. 1^e druk, Chapman and Hall, Londen.

Nicol J.F., Humphreys M.A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, vol.34, issue 6, pp. 563-572.

Oeffelen, E.C.M. van (2007). Thermisch comfort bij toepassing van een ventilatiesysteem met natuurlijke toevoer in combinatie met lage temperatuur verwarming – Onderzoek met proefpersonen onder laboratoriumomstandigheden en toepassing van een thermofysiologisch model. *Afstudeerrapport Master Architecture, Building and Planning, Mastertrack Physics of the Built Environment, Faculteit Bouwkunde, Technische Universiteit Eindhoven*.

Palonen, J., Seppänen, O., Jaakkola, J.J.K. (1993). The Effects of Air Temperature and Relative Humidity on Thermal Comfort in the Office Environment. *Indoor Air*, vol. 3, pp. 391-397.

Preller L., Zweers T., Brunekreef B., Boleij J.S.M. (1990). Sick leave due to work-related health complaints among office workers in the Netherlands. *Indoor Air*, vol. 1, pp. 227-290.

Olesen B.W., Parsons, K.C. (2002). Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. *Energy and Buildings*, vol. 34, pp. 537-548.

Olesen, B.W. (2004). International standards for the indoor environment. *Indoor Air*, vol. 14 supplement 7, pp. 18-26.

Ooijen, A.M.J. van, Marken Lichtenbelt, W.D. van, Steenhoven, A.A. van, Westerterp, K.P. (2004). Seasonal changes in metabolic and temperature responses to cold air in humans. *Physiology & Behavior*, vol.82, pp. 545-553.

Oseland N.A. (1999). Environmental factors affecting office worker performance: a review of evidence. Technical memorandum TM24. CIBSE, Londen, Verenigd Koninkrijk.

Raw G.J., Roys M.S. (1990). Further findings from the office environment survey: productivity. *Indoor Air*, vol. 1, pp. 231-236.

Rolloos. (1999). *Energiebesparing niet ten koste van het binnenmilieu*. TNO Bouw, Delft.

Roulet C.A. (2006). Indoor air quality and energy performance of buildings. In *Proceedings Healthy Buildings 2006*, vol. 1, pp. 37-47.

Rubinstein E.H., Sessler D.I. (1990). Skin-surface temperature gradients correlate with fingertip blood flow in humans. *Anesthesiology*, vol. 73, pp. 541-545.

Sessler, G.I. (2003). Skin-temperature gradients are a validated measure of fingertip perfusion. *European Journal of Applied Physiology*, vol. 89, pp. 401-402.

Seppänen O., Fisk W.J. (2005). Indoor climate and productivity. *Rehva Journal*, vol. 3 (4), pp. 8-11.

Seppänen O., Fisk W.J., Lei Q.H. (2006). Ventilation and performance in office work. *Indoor Air*, vol. 16, pp. 28-36.

Severens N.M.W., Marken Lichtenbelt W.D. van, Frijns A.J.H., Steenhoven A.A. van, Mol B.A.J.M. de, Sessler D.I. (2007). A model to predict patient temperature during cardiac surgery. *Physics in Medicine and Biology*, vol. 52, pp. 5131-5145.

Schiller G.E. (1988a). A comparison of measured and predicted comfort in office buildings. *ASHRAE Transactions*, vol. 96 part 1, pp. 609–22.

Schiller, G.E., Arens, E.A., Bauman, F.S., Benton, C., Fountain, M., Doherty, T. (1988b). A field study of thermal environments and comfort in office buildings. *ASHRAE Transactions*, vol. 94 part 2, pp. 280-308.

Siri W.E. (1961). Body composition from fluid spaces and density: analysis of methods. In J.Brozek en A.Henschel, *Techniques for measuring Body composition*, pp. 223-244, National Academy of Sciences, Washington D.C.

Stolwijk, J.A.J. en Hardy, J.D. (1966). Temperature regulation in man – A theoretical study. *Pflügers Archiv*, vol. 291, pp. 129-162.

Stolwijk, J.A.J. (1971). A mathematical model of physiological temperature regulation in man. *NASA Report CR-1855*, Washington D.C.

Stolwijk J.A.J., Hardy J.D. (1977). Control of body temperature, in *Handbook of Physiology*, pp. 45-68, American Physiological Society, Bethesda, Maryland.

Sundell J., Lindvall T. (1993). Indoor air humidity and sensation of dryness as risk indicators of SBS. *Indoor Air*, vol. 3, pp. 382-390.

Sundell J. (1994). On the association between building ventilation characteristics, some indoor environmental exposures, some allergic manifestations and subjective symptom reports. *Indoor Air*, 1994, supplement 2, pp. 1-148.

Sweet S.A., Grace-Martin k. (2003). *Data analysis with SPSS – A first course in applied statistics*. Pearson Education Inc., USA.

Tanabe S. (2006). Indoor temperature, productivity and fatigue in office tasks. In *Proceedings Healthy Buildings 2006*, vol. 1, pp. 49-56.

Toftum J., Langkilde, G., Fanger, P.O. (2004). New indoor environment chambers and field experiment offices for research on human comfort, health and productivity at moderate energy expenditure. *Energy and Buildings*, vol. 36, pp. 899-903.

Toftum, J., Wyon, D.P., Svanekjaer, H., Lantner, A. (2005). Remote performance measurement (RPM) – A new, internet-based method for the measurement of occupant performance in office buildings. In *Proceedings of Indoor Air 2005, the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Beijing, China, 2005, pp. 357-361.

US Departement of Energy, (2001). Benefits of energy efficient lighting. USDE, Washington DC, VS.

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.

Wargocki, P., Wyon, D.P., Baik, Y.K., Clausen, G., Fanger, P.O. (1999). Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity in an Office with Two Different Pollution Loads. *Indoor air*, vol. 9, pp. 165-179.

Wargocki, P., Wyon, D.P., Fanger, O.P. (2000). Productivity is affected by the air quality in offices. In *Proceedings of Healthy Buildings 2000*; Vol.1, pp. 635-640.

Wargocki P., Wyon D.P., Fanger P.O. (2003). Call-centre operator performance with new and used filters at two outdoor air supply rates. In *Proceedings Healthy Buildings 2003, Singapore 2003*, vol. 3, pp. 213-218.

Wargocki P., Wyon D.P., Matysiak B., Irgens S. (2005). The effects of classroom air temperature and outdoor air supply rate on the performance of school work by children. In *Proceedings Indoor Air 2005, China, Indoor air 2005*, vol. 1, pp. 368-372.

Weston, R. (2004). Atlas van de anatomie. Rebro Productions, 11^e druk, Lisse.

Witterseh T., Wyon D.P., Clausen G. (2002). The effects of moderate heat stress and open-plan office noise distraction on office work. *Indoor air*, vol. 4, pp. 1084-1089.

Wyon D.P. (1969). The effect of moderate heat stress on the mental performance of children. National Swedish Building Research, document 8.

Wyon D.P. (1996). Individual microclimate control: required range, probable benefits and current feasibility. In *Proceedings Indoor Air 1996, Japan, Indoor Air 1996*, vol. 1, pp. 1067-1072.

Wyon D.P. (2000). Individual control at the workplace: the means and the potential benefits. Clements-Croome D. editie. 2000. *Creating the productive workplace*, E & FN SPON, 192-206.

Ye, X.J., Zhou, Z.P., Lian, Z.W., Liu, H.M., Li, C.Z., Liu, Y.M. (2006). Field study of a thermal environment and adaptive model in Shanghai. *Indoor Air*, vol. 16, pp. 320-326.

Websites

ASHRAE (2007) <http://www.ashrae.org/pressroom/detail/13535>
SenterNovem (2007) <http://www.senternovem.nl>
Lowex (2007) <http://www.lowex.nl>
ECBCS (2007) <http://www.ecbcs.org>
Voedingscentrum (2007) <http://www.voedingscentrum.nl>
ARBO-dienst <http://www.arbo.nl>

Nomenclatuur

A_D	Dubois lichaamsoppervlakte	$[m^2]$
a	constante	$[-]$
a_{nat}	regressiecoëfficiënt voor natuurlijke conventie	$[-]$
a_{frc}	regressiecoëfficiënt voor gedwongen conventie	$[-]$
a_{mix}	regressiecoëfficiënt voor gemengde conventie	$[-]$
BMI	body mass index	$[kg/m^2]$
Cs	vasoconstrictie in thermofysiologisch model	$[W/K]$
DI	vasodilatatie in thermofysiologisch model	$[W/K]$
DR	percentage ontevreden personen door tocht	$[%]$
DTS	Dynamic Thermal Sensation	$[-]$
d_i	verschil tussen gemeten en gesimuleerde waarde	$[-]$
f_{cl}	vergrotingsfactor ten gevolge van kleding	$[-]$
f_{sk}	functie van de huidtemperatuur in DTS	$[-]$
H	lichaamslengte	$[m]$
h_c	warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie	$[W/m^2K]$
h_r	warmteoverdrachtscoëfficiënt voor straling	$[W/m^2K]$
I_{cl}	thermische kledingweerstand	$[clo]$
i_f	vochtpermeabiliteitsindex van kleding	$[-]$
M	metabolisme	$[W/m^2]$
M_{shiv}	interne warmteproductie ten gevolge van rillen	$[W/m^2]$
n	aantal waarnemingen	$[-]$
P_a	partiële waterdampdruk	$[kPa]$
PD	percentage ontevreden personen	$[%]$
PMV	predicted mean vote	$[-]$
PPD	voorspeld percentage ontevreden personen	$[%]$
$R_{e,f}$	verdampingsweerstand ten gevolge van kleding	$[m^2kPa/W]$
rmsd	root mean squared deviation	$[-]$
R^2	determinatiecoëfficiënt	$[-]$
R^2_{adj}	aangepaste determinatiecoëfficiënt	$[-]$
r	correlatiecoëfficiënt	$[-]$
T_a	ruimtetemperatuur	$[^{\circ}C, K]$
T_{cr}	kerntemperatuur	$[^{\circ}C, K]$
ΔT_{hy}	temperatuurverschil tussen actuele kerntemperatuur en setpointwaarde voor de kerntemperatuur in thermofysiologisch model	$[^{\circ}C]$
$T_{o,mean}$	gemiddelde buitentemperatuur	$[^{\circ}C, K]$
T_{pr}	stralingstemperatuur	$[^{\circ}C, K]$

ΔT_{pr}	asymmetrisch stralingstemperatuurverschil	[°C, K]
t_r	gemiddelde stralingstemperatuur	[°C]
TS	thermische sensatie	[-]
T_{sf}	oppervlaktetemperatuur	[°C, K]
$T_{sk;gem}$	gemiddelde huidtemperatuur	[°C, K]
$\Delta T_{sk;gem}$	temperatuurverschil tussen actuele gemiddelde huidtemperatuur en de setpointwaarde voor gemiddelde huidtemperatuur in thermofysiologisch model	[°C]
T_u	lokale turbulentie-intensiteit, gedefinieerd als de verhouding tussen de standaarddeviatie van de lokale luchtsnelheid en de lokale gemiddelde luchtsnelheid	[%]
t	tijd	[s] [min] [h]
t_a	luchttemperatuur	[°C]
$\Delta t_{a,v}$	Verticaal luchttemperatuurverschil tussen hoofd en enkels	[°C]
t_{cl}	oppervlaktetemperatuur van gekleed lichaam	[°C]
$t_{verstreken}$	de verstreken tijd van de meetsessie	[min]
U_{cl}	lokale warmteoverdrachtscoëfficiënt ten gevolge van de kleding	[W/m ² K]
v_a	gemiddelde luchtsnelheid	[m/s]
W	externe mechanische arbeid	[W/m ²]
W	lichaamsgewicht	[kg]

Griekse symbolen

α	intercept ten behoeve van regressiemodel	[-]
β	regressiecoëfficiënt ten behoeve van regressiemodel	[-]
β_1	regressiecoëfficiënt ten behoeve van regressiemodel	[-]
β_2	regressiecoëfficiënt ten behoeve van regressiemodel	[-]
ε	storingsterm ten behoeve van regressiemodel	[-]
ρ_m	dichtheid lichaamsweefsel mannen	[10 ³ kg/m ³]
σ	standaarddeviatie	[-]
γ	regressiecoëfficiënt ten behoeve van kwadratisch regressiemodel	[-]

Appendices

Inhoudsopgave appendices

Appendix 1. Comfortvergelijkingen	A1
Appendix 2. Meetapparatuur	A3
Appendix 3. Proefpersonen informatie	A7
Appendix 4. Vragenlijst.....	A11
Appendix 5. Overzicht teksten uit teksttaak	A15
Appendix 6. Meetprotocol.....	A23
Appendix 7. Bewegingsoefening	A25
Appendix 8. Gemeten omgevingsparameters	A27
8.1 Meet sessie 1	A27
8.2 Meet sessie 2	A31
Appendix 9. Gemeten fysiologische parameters	A35
9.2 Meet sessie 1	A35
9.2 Meet sessie 2	A38
Appendix 10. Resultaten comfortvragenlijsten	A57
10.1 Thermische sensatie vs luchttemperatuur	A57
10.2 Thermische sensatie vs huidtemperatuur	A59
10.3 Thermische sensatie vs kerntemperatuur	A61
10.4 Thermische sensatie vs ΔT onderarm-vingertop	A63
10.5 Thermische sensatie vs ΔT scheenbeen-teentop	A65
10.6 Thermisch comfort en wensen	A67
10.7 Vergelijking thermische sensatie enquête, PMV en regressie	A69
Appendix 11. Resultaten productiviteit- en prestatietesten.....	A71
11.1 Gemaakte sommen vs luchttemperatuur	A71
11.2 Gemaakte sommen vs huidtemperatuur	A73
11.3 Percentage correcte sommen vs luchttemperatuur	A74
11.4 Percentage correcte sommen vs huidtemperatuur	A76
11.5 Getypte karakters per minuut vs luchttemperatuur	A77
11.6 Getypte karakters per minuut vs huidtemperatuur	A78
11.7 Correcte karakters per minuut vs luchttemperatuur	A79
11.8 Correcte karakters per minuut vs huidtemperatuur	A80
Appendix 12. Vergelijking simulatie- en meetresultaten	A81
12.1 Resultaten gesimuleerde gemiddelde huidtemperaturen	A81
12.2 Resultaten gesimuleerde gemiddelde huidtemperaturen $v_a=0,05$ m/s	A84
12.3 Resultaten gesimuleerde gemiddelde kerntemperaturen	A87
12.4 Gesimuleerde vasomotie onderarm-vingertop,	A90
12.5 Gesimuleerde vasomotie scheenbeen-teentop	A92
12.6 Gesimuleerde Dynamische Thermische sensatie	A94

Appendix 1. Comfortvergelijkingen

Comfortvergelijking:

$$\begin{aligned}
 & M - W - 3,05[5,73 - 0,007(M - W) - P_a - 0,42[(M - W) - 58,15] \\
 & - 0,0173M(5,87 - P_a - 0,0014M(34 - t_a)) \\
 & = 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

PMV model:

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0,303e^{-0,036M} + 0,028) \cdot [(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \{5733 - 6,99(M - W) - P_a\} \\
 & - 0,42\{(M - W) - 58,15\} - 1,7 \cdot 10^{-5} M(5867 - P_a) - 0,0014M(34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \\
 & \cdot f_{cl}\{(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4\} - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)]
 \end{aligned} \tag{A.2}$$

PPD model:

$$PPD = 100 - 95e^{-(0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2)} \tag{A.3}$$

Vergelijking DTS:

$$DTS = 3 \cdot \tanh[f_{Tskin} + f_{Tcore} + f_{\Delta Tskin}] \tag{A.4}$$

Hierin geldt:

$$f_{Tskin} = 1,078 \cdot \Delta T_{sk;gem} \text{ voor } \Delta T_{sk;gem} > 0 \tag{A.5}$$

$$f_{Tskin} = 0,301 \cdot \Delta T_{sk;gem} \text{ voor } \Delta T_{sk;gem} < 0 \tag{A.6}$$

$$f_{Tcore} = 7,94 \cdot \exp\left(\frac{-0,02}{\Delta T_{hy} + 0,4} + \frac{7,612}{\Delta T_{sk;gem} - 4}\right) \tag{A.7}$$

$$f_{\Delta Tskin} = \left(0,11 \cdot \frac{dT_{sk;gem}^-}{dt} 1,91 \cdot e^{-0,681\Delta t} \cdot \frac{dT_{sk;gem}^-}{dt_{max}}\right) \cdot \frac{1}{1 + f_{Tcore}} \tag{A.8}$$

Appendix 2. Meetapparatuur

Tabel A.1: Specificaties van de benodigde meetapparatuur voor de omgevingsparameters

Variabele	Eenheid	Range	Nauwkeurigheid		Responsietijd (90%) [s]		Interval [s]
			Vereist	Gewenst	Vereist	Gewenst	
Luchttemperatuur	°C	10-40	±0.5	±0.2	z.k.m		60
Relatieve luchtvochtigheid	%	0-100	±5.0	±2.0	z.k.m		60
Gemiddelde stralings-temperatuur	°C	10-40	±2.0	±0.2	z.k.m		60
Luchtsnelheid	m/s	0.05-1.0	±(0.05+0.05 v _a)	±(0.02+0.07 v _a)	0.2	5	1
Absolute vochtigheid uitgedrukt als de partiële dampdruk	kPa	0.5-3.0	±0.15	±0.15	z.k.m		-
Oppervlakte temperatuur	°C	0-50	±1.0	±0.5	z.k.m		60
Inblaas-temperatuur	°C	0-60	±0.5	±0.2	z.k.m		60
CO ₂	ppm	-	-	-	z.k.m		60
Verlichtingssterkte	Lux	-	-	-	z.k.m		60

z.k.m.= zo kort mogelijk

Tabel A.2: Specificaties van de benodigde meetapparatuur voor de fysiologische parameters

Variabele	Eenheid	Range	Nauwkeurigheid		Responsietijd (90%) [s]		Interval [s]
			Vereist	Gewenst	Vereist	Gewenst	
Huidtemperatuur	°C	25-40	±0.1	±0.1	< 30		60
Kerntemperatuur	°C	25-40	±0.1	±0.1	< 30		60

Tabel A.3: Specificaties van de gebruikte meetapparatuur

Variabele	Fabrikant	Type	Serienr	Id nr. TU/e	Logger	Positie
Luchttemperatuur	NTC	DC95	-	1321	Squirrel 2040	Comfortpaal; 0,1m
	NTC	DC95	-	1322	Squirrel 2040	Comfortpaal; 0,6m
	NTC	DC95	-	1323	Squirrel 2040	Comfortpaal; 1,1m
	NTC	DC95	-	1324	Squirrel 2040	Comfortpaal; 1,7m
	NTC	DC95	-	1325	Squirrel 2040	Op tafel ter controle van PID regelaar
	NTC	DC95	-	1326	Squirrel 2040	Op kast
	-	PT1000	-	1333	Squirrel 2040	0,5m voor inblaasrooster
	-	PT1000	-	1334	Squirrel 2040	Achter uitlaat lbk
	-	PT1000	-	1335	Squirrel 2040	In laboratorium
Relatieve luchtvochtigheid	Honeywell	HIH-4000	-	1321	Squirrel 2040	Comfortpaal; 0,1m
	Honeywell	HIH-4000	-	1322	Squirrel 2040	Comfortpaal; 0,6m
	Honeywell	HIH-4000	-	1323	Squirrel 2040	Comfortpaal; 1,1m
	Honeywell	HIH-4000	-	1324	Squirrel 2040	Comfortpaal; 1,7m
	Honeywell	HIH-4000	-	1325	Squirrel 2040	Op tafel ter controle van PID regelaar
	Honeywell	HIH-4000	-	1326	Squirrel 2040	Op kast
Gemiddelde stralings-temperatuur	Sensor data / NTC	BG2-150-MS T-sens 399 / DC95	-	344	Squirrel 2040	Comfortpaal; 0,1m
	Sensor data / NTC	BG2-150-MS T-sens 399 / DC95	-	345	Squirrel 2040	Comfortpaal; 1,1m
	Sensor data / NTC	BG2-150-MS T-sens 399 / DC95	-	1250	Squirrel 2040	Op tafel
Luchtsnelheid	Dantec	9054R0102	2175	105	NI USB-6009	Comfortpaal; 0,1m
	Dantec	9054R0102	2173	106	NI USB-6009	Comfortpaal; 0,6m
	Dantec	9054R0102	525	107	NI USB-6009	Comfortpaal; 1,1m
	Dantec	9054R0102	526	108	NI USB-6009	Comfortpaal; 1,7m
	Dantec	9054R0102	2170	109	NI USB-6009	Midden in ruimte op statief

Vervolg tabel A.3

Variabele	Fabrikant	Type	Serienr.	Id nr. TU/e	Logger	Positie
Oppervlakte temperatuur	-	PT100	-	1327	Squirrel 2040	Midden Rechter-zijwand
	-	PT100	-	1328	Squirrel 2040	Midden Achterwand
	-	PT100	-	1329	Squirrel 2040	Midden Linkerzijwand
	-	PT100	-	1330	Squirrel 2040	Midden Voorwand onder 'raam'
	-	PT100	-	1331	Squirrel 2040	Midden Vloer
	-	PT100	-	1332	Squirrel 2040	Midden Plafond
Concentratie koolstofdioxide	Vaissalla	-	-	341	Squirrel 2040	Op tafel
Verlichtingssterkte	Hagner	Lux meter E2	-	762	Squirrel 2040	Op tafel
	Hagner	Standard external detector for instrnr. SD2	-	-	-	Op tafel
Huidtemperatuur	iButton	-	014F20 00005D 1121	1	-	Voorhoofd
	iButton	-	8D4F2 000005 EF421	2	-	Achterzijde nek
	iButton	-	AB4F2 000006 6A221	3	-	Rechter schouderblad
	iButton	-	0A4F20 00005D CB21	4	-	Linker borst
	iButton	-	7D4F2 000005 D9821	5	-	Rechter bovenarm
	iButton	-	104F20 000066 6D21	6	-	Linker bovenarm
	iButton	-	EF4F2 000005 DB721	7	-	Linkerhand
	iButton	-	784F20 000064 6821	8	-	Rechterzijde buik
	iButton	-	954F20 00005D 0B21	9	-	Linkerzijde onderrug
	iButton	-	FE4F2 000003 9D321	10	-	Rechter bovenbeen
	iButton	-	3F4F20 000067 A121	11	-	Linker dijbeen achter

Vervolg tabel A.3

Variabele	Fabrikant	Type	Serienr.	Id nr. TU/e	Logger	Positie
Huidtemperatuur	iButton	-	884F20 000066 1D21	12	-	Rechter scheenbeen
	iButton	-	484F20 000069 6C21	13	-	Linker kuit
	iButton	-	D64F2 000006 A0221	14	-	Rechter wreef
	iButton	-	1F4F20 00005D F021	15	-	Vingertop linkerhand
	iButton	-	DB4F2 000006 01721	16	-	Linker onderarm
	iButton	-	AD4F2 000006 80921	17	-	Teentop rechtervoet
Kerntemperatuur	NTC	DC95	-	1373	Eltek 1000 RX 250	Rectum

Tabel A.4: Overzicht specificaties loggers

Fabrikant	Type	Serienr.	Id nr. TU/e
Grant Instruments	Squirrel 2040	KV0613003	893
Grant Instruments	Eltek 1000 RX 250	-	741
National instruments	USB-6009	1202764	1027

Voor een overzicht van de kalibratiegegevens van de gebruikte meetapparatuur wordt verwezen naar de CD.

Appendix 3. Proefpersonen informatie

Inleiding

In de laatste jaren wordt er veel aandacht besteed aan het comfort van personen in gebouwen. Verschillende studies hebben uitgewezen dat gebruikers in natuurlijk geventileerde gebouwen zich over het algemeen comfortabeler voelen dan gebruikers in volledig geklimatiseerde gebouwen. In natuurlijk geventileerde gebouwen accepteren gebruikers een ruimere temperatuurrange en meer fluctuaties in de temperatuur gedurende de dag. Het toestaan van meer fluctuaties en een bredere temperatuurrange zorgt er voor dat de temperatuur niet statisch geregeld hoeft te worden. Er wordt verondersteld dat het dynamisch regelen van een klimaatsysteem kan leiden tot het verbeteren van het thermisch comfort en tot een grotere energiebesparing.

Dit onderzoek is gericht op het bepalen van de invloed van een dergelijke dynamische klimaatregeling op het thermisch comfort en de productiviteit van gebruikers. Voor het bepalen van deze invloed zal er een relatie gelegd worden tussen fysiologische parameters, het thermisch comfort en de productiviteit.

Methode

In totaal worden er acht gezonde, mannelijke, personen tussen de 20 en 30 jaar gevraagd deel te nemen aan dit onderzoek. Iedere proefpersoon verblijft twee maal gedurende een periode van een hele werkdag in de onderzoeksruimte.

De productiviteit en het algemeen thermisch comfort worden onderzocht onder verschillende thermische omstandigheden. De exacte omstandigheden blijven voor de proefpersoon onbekend, omdat dit een invloed kan hebben op de perceptie van de omgeving. Gedurende de meetsessie dient de proefpersoon elke 30 minuten een vragenlijst in te vullen, deze vragenlijst informeert naar het algemeen comfort van de proefpersoon. Tevens dient de proefpersoon elke 30 minuten een test te maken, aan de hand van deze test wordt de productiviteit vastgesteld. Zowel de vragenlijst als de test worden aangeboden via het internet.

Meetapparatuur

Gedurende de meetsessie worden verschillende omgevingsparameters en fysiologische parameters gemonitord. De fysiologische parameters worden gemeten met behulp van zestien huidtemperatuur sensoren. De kerntemperatuur wordt gemeten met behulp van een rectale sensor.

Er wordt van de proefpersoon verwacht dat deze zorgvuldig en voorzichtig omgaat met de aanwezige apparatuur.

Verloop van de meetsessie

De proefpersoon wordt om 8.15u verwacht in het laboratorium van de Faculteit Bouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven. Na aankomst en ondertekening van de toestemming wordt de proefpersoon gevraagd zich om te kleden. Om er voor te zorgen dat de resultaten van de proefpersonen na afloop van de meetsessie vergelijkbaar met elkaar zijn dienen de verschillen tussen de proefpersonen zo klein mogelijk gehouden te worden. Om deze redenen dienen de proefpersonen tijdens de meetsessie standaard kleding te dragen, deze bestaat uit een joggingbroek en een bijbehorend vest. De proefpersonen dienen hun eigen ondergoed, sokken en schoenen (laag model) te dragen.

Na het omkleden dient er, voorafgaand aan de meetsessie, een lichte exercitie uitgevoerd te worden. Hierdoor wordt er bewerkstelligd dat het activiteitsniveau van de proefpersonen bij aanvang van de meetsessie gelijk is. Na het verrichten van deze lichte inspanning worden er een aantal lichaamskarakteristieken gemeten, waaronder het gewicht, de lengte, huidplooiën en omtrekken van lichaamsdelen. Deze worden gemeten om een indicatie te kunnen geven na afloop van het onderzoek over persoonsgebonden kenmerken in relatie tot de perceptie van de thermische omgeving.

Vervolgens worden op verschillende plaatsen op het lichaam draadloze huidtemperatuur sensoren aangebracht, deze worden aangebracht met behulp van tape. Verder is het voor het onderzoek wenselijk dat de kerntemperatuur gemeten wordt, deze wordt gemeten met behulp van een rectale sensor. Indien de proefpersoon toestemming geeft voor het verrichten van deze meting dient deze de sensor zelf aan te brengen. Na het aanbrengen van de rectale sensor wordt de proefpersoon naar de onderzoeksruijme gebracht.

Gedurende de meetsessie dient de proefpersoon lichte kantoorwerkzaamheden te verrichten, zoals lezen, schrijven of typen. Iedere 30 minuten wordt er gevraagd om een vragenlijst in te vullen en een test te maken.

Tijdens de meetsessie is er twee maal een pauze, er wordt door de onderzoeker aangegeven wanneer deze is. Verder wordt er gevraagd aan de proefpersoon om zo min mogelijk door te ruimte te bewegen en zo veel mogelijk op te plaats te blijven zitten. Indien de proefpersoon zich verplaatst, dient deze dit aan te geven.

Om de verschillen tussen de proefpersonen zo klein mogelijk te houden wordt de lunch verzorgd door de onderzoeker. Gedurende de dag mag er zoveel water gedronken worden als gewenst en mag ieder kwartier een biscuitje worden genuttigd. Het eten en drinken van andere voedingsmiddelen is in verband met eerder genoemde eventueel optredende verschillen niet toegestaan.

De meetsessie zal omstreeks 17.30u afgelopen zijn.

Dag en ochtend voor meetsessie

Om er voor te zorgen dat de verschillen tussen de proefpersonen zo klein mogelijk zijn en het onderzoek goed verloopt dient de proefpersonen een aantal zaken in acht te nemen:

- De nacht voorafgaand aan het onderzoek dient u voldoende nachtrust te hebben gehad, zodat u uitgerust aan het onderzoek kunt deelnemen.
- De dag voorafgaand aan het onderzoek is het niet toegestaan om alcoholische dranken te nuttigen.
- Op de dag van het onderzoek dient u een gebruikelijk ontbijt te hebben genuttigd.
- Tijdens de meetsessie dient u schoenen te dragen die uw enkels niet bedekken.
- Tijdens de meetsessie zullen de vragenlijsten beantwoord worden met behulp van een computer, indien u geen eigen laptop heeft dient u dit tijdig aan te geven.

Behandeling van de gegevens

De privacy van de proefpersoon blijft altijd gewaarborgd. Alle verzamelde gegevens worden uiterst zorgvuldig en strikt vertrouwelijk behandeld. Alleen onderzoekers van de Technische Universiteit Eindhoven hebben toegang tot de gegevens. De antwoorden worden niet gekoppeld aan de naam van de proefpersoon, maar slechts aan een toegekend nummer.

Vrijwilligheid van deelname

Deelname aan dit onderzoek is geheel vrijwillig. Denk er rustig over na of u mee wilt doen. Als u nog vragen heeft betreffende dit onderzoek kunt u altijd contact opnemen met Lisje Schellen, via L.Schellen@student.tue.nl of via 06-51*****.

Toestemmingsverklaring

Voor deelname aan het wetenschappelijk onderzoek: *'De invloed van een dynamisch binnenklimaat op productiviteit en thermisch comfort'*.

Ik ben over het onderzoek geïnformeerd en ik heb de schriftelijke informatie gelezen. Ik ben in de gelegenheid gesteld om vragen over het onderzoek te stellen. Ik heb over mijn deelname aan het onderzoek kunnen nadenken. Ik heb besloten tot deelname aan het onderzoek en geef hierbij toestemming om mijn antwoorden te gebruiken voor wetenschappelijke doeleinden. Ik heb het recht mijn toestemming op ieder moment weer in te trekken zonder dat ik daarvoor een reden dien op te geven.

Ik stem toe met deelname aan het onderzoek.

Naam:

Geboortedatum:

Telefoonnummer:

Datum:

Handtekening:

.....

(Onderstaande in te vullen door onderzoeker)

Ondergetekende, verantwoordelijke onderzoeker, verklaart dat de hierboven genoemde persoon schriftelijk over het bovenvermelde onderzoek is geïnformeerd.

Naam: L.Schellen BSc.

Functie: Student

Datum:

Handtekening:

.....

Appendix 4. Vragenlijst

Bepaling van de invloed van een dynamische klimaatregeling op de prestatie van gebruikers

Allereerst wil ik u graag nogmaals bedanken voor uw deelname aan dit onderzoek.

Gedurende de dag wordt er onderzocht wat de invloed is van verschillende thermische omstandigheden op het algemeen thermisch comfort en de productiviteit. De exacte omstandigheden blijven voor u onbekend, omdat dit een invloed kan hebben op de perceptie van de omgeving. Gedurende de meetsessie dient u elke 30 minuten een vragenlijst in te vullen en een aantal testen te maken. De tijdstippen waarop de vragenlijsten ingevuld dienen te worden, worden aangegeven door middel van een alarm.

De vragenlijsten en testen worden aan u gepresenteerd door middel van uw internetbrowser. Soms is het mogelijk dat de 'back' functie in uw browser de volgorde van de vragenlijsten verstoort, ik zou u dan ook graag willen verzoeken om deze functie gedurende het experiment niet te gebruiken.

Het duurt ongeveer 10 minuten voordat u de vragenlijsten en de oefeningen heeft ingevuld.

Indien er nog vragen zijn, of indien u hulp nodig heeft, kunt u ten alle tijden contact opnemen via de intercom die aanwezig is in de ruimte.

Bedankt voor uw deelname

Volgende

Hoe dienen de vragen ingevuld te worden

Indien er bij een vraag een schaal weergegeven is dient u hier met behulp van uw linkermuisknop op te klikken. Als u dit gedaan heeft verschijnt er een rode marker op de schaal. Door ergens anders op de schaal te klikken kunt u deze verplaatsen.

De oefeningen bestaan uit twee soorten taken: de opteltaak en de teksttyptaak.

Bij de opteltaak wordt er verwacht dat u de twee getallen bij elkaar optelt en het antwoord invult in het aangegeven kader. Het is de bedoeling dat deze taak gemaakt wordt zonder gebruik van een rekenmachine.

Bij de teksttyptaak is het de bedoeling dat u het stukje tekst, welk verschijnt in het tekstkader, foutloos overtypet. Het is niet mogelijk om de tekst te knippen en te plakken.

Behandeling van de gegevens

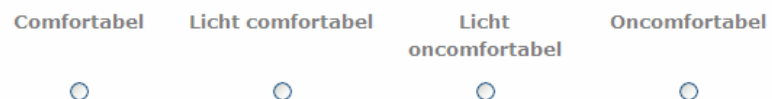
De privacy van de proefpersoon blijft altijd gewaarborgd. Alle verzamelde gegevens worden uiterst zorgvuldig en strikt vertrouwelijk behandeld. Alleen onderzoekers van de Technische Universiteit Eindhoven hebben toegang tot de gegevens. De antwoorden worden niet gekoppeld aan de naam van de proefpersoon, maar slechts aan een toegekend nummer.

Persoonlijk comfort

1. Hoe voel je je op dit moment?



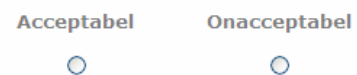
2. Vind je dit...?



3. Wat zou je op dit moment liever willen?



4. Hoe vind je de thermische omgeving?



Volgende

Persoonlijk comfort

5. Hoe ervaar je op dit moment het binnenklimaat?

Te vochtig |-----| Te droog

Te donker |-----| Te licht

Te stil |-----| Te luidruchtig

Te muff |-----| Te fris

6. Op dit moment heb ik last van:

- ☐ Droge ogen
- ☐ Tranende ogen
- ☐ Verstopte neus
- ☐ Loopneus
- ☐ Droge/geïrriteerde keel
- ☐ Droge lippen
- ☐ Benauwdheid
- ☐ Droge huid
- ☐ Geïrriteerde huid
- ☐ Hoofdpijn
- ☐ Lusteloosheid
- ☐ Slaperig

7. Andere symptomen

8. Geef aan in welke mate je stress ervaart:

Geen stress |-----| Veel stress

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

0% |-----| 100%

Volgende

Appendix 5. Overzicht teksten uit teksttaak

In ruimtes die bestemd zijn voor menselijke bezetting wordt de binnenluchtkwaliteit vaak gedefinieerd als de mate waarin aan menselijke behoeften wordt voldaan. Maar welke behoeften hebben mensen met betrekking tot de binnenlucht? Het is wenselijk dat de lucht wordt ervaren als zuiver en aangenaam. Dit betekent dat de lucht geen negatieve invloed mag hebben op de gezondheid en dat de lucht het werk moet stimuleren. De binnenlucht zou de productiviteit van werknemers en de schoolprestaties van kinderen moeten verhogen. In de huidige normen en richtlijnen voor ventilatie worden deze laatste twee aspecten niet meegenomen, er wordt uitgegaan van de bescheiden eis dat de binnenluchtkwaliteit 'acceptabel' dient te zijn. Dit houdt in dat de meest gevoelige groep personen (doorgaans 20%) de lucht als onacceptabel zal beoordelen en dat de overgebleven groep minder gevoelige personen de kwaliteit van de lucht maar net acceptabel zal vinden. Met een dergelijk bescheiden doel is het niet verwonderlijk dat uitgebreide praktijkstudies in gebouwen waar aan de eerdergenoemde ventilatienormen wordt voldaan, in veel landen hoge percentages van ontevreden personen laten zien.

Het voorkomen van allergische en astmatische ziekten is de afgelopen twee decennia verdubbeld in ontwikkelde landen. Deze ziekten vormen één van de grootste actuele problemen van de volksgezondheid, en brengen enorme kosten in geneesmiddelen, behandelingen en arbeidsverzuim met zich mee. Bornehag et al. [2004] veronderstellen dat de verslechtering van de IAQ in woningen in ontwikkelde landen de voornaamste reden is voor de toename van deze ziekten. De IAQ is verminderd door uitgebreide campagnes omwille van energiebesparing, en hoge energieprijzen hebben ervoor gezorgd dat woningen erg luchtdicht zijn gemaakt om de mate van ventilatie te beperken. Daardoor is het ventilatievoud in veel woningen historisch laag. Andere factoren die bijdragen aan een slechte binnenluchtkwaliteit zijn de vele nieuwe materialen, vooral polymeren, en de talrijke elektronische apparaten die in de afgelopen decennia in woningen, en vooral in kinderkamers, zijn geïntroduceerd. Bornehag et al. [2004, 2005] hebben de relatie tussen de IAQ en astma/allergie bestudeerd in een Scandinavisch onderzoek. Dit onderzoek is onder 11.000 kinderen verricht.

Een serie van recent uitgevoerde, onafhankelijke onderzoeken laat zien dat een verbetering van de luchtkwaliteit een significante positieve invloed heeft op de productiviteit van kantoorbedienden. In één onderzoek is een goed controleerbare normale kantoorruimte (praktijk laboratorium) gebruikt, waarin twee verschillende luchtkwaliteiten zijn gerealiseerd. Dit is gedaan door in één situatie een vloertapijt in de ruimte te brengen als extra bron van verontreiniging, onzichtbaar voor de gebruikers van de ruimte [Wargocki et al., 1999]. De twee gevallen komen overeen met een verontreinigd gebouw en een gebouw met weinig verontreiniging zoals gespecificeerd is in de Europese richtlijnen voor het ontwerp van het binnenmilieu [CEN, 1998]. Dezelfde proefpersonen werkten in beide luchtkwaliteiten gedurende 4,5 uur aan gesimuleerde kantoorwerkzaamheden. De productiviteit van de proefpersonen bleek 6,5% hoger te zijn ($P < 0,003$) in de situatie met een goede luchtkwaliteit. Daarnaast is gebleken dat de proefpersonen in die situatie minder fouten maakten en minder symptomen van het Sick Building Syndrome ondervonden.

Het is bekend dat de IAQ in scholen vaak slecht is. Ventilatie is in veel gevallen beperkt om energie te besparen, en de bediening en het onderhoud van de luchtbehandelingsystemen zijn vaak

ontoereikend. Er bestaat een vermoeden dat een slechte luchtkwaliteit in een klaslokaal een negatieve invloed kan hebben op schoolprestaties van kinderen. Dit is onlangs onderzocht door Wargocki et al. [2005] die equivalente klassen van 10-jarige kinderen bestudeerden en het effect van verhoogde ventilatie op de schoolprestaties van de kinderen vaststelden. In geschikte lessen gaven de leraren iedere week vastgelegde equivalente versies van prestatietaken aan de kinderen. Deze taken vertegenwoordigden verschillende aspecten van het schoolwerk, van lezen tot en met rekenen. In de ventilatiesystemen werden schone filters gebruikt. Door het ventilatiedebiet van 5 naar 10 l/s te verhogen namen de schoolprestaties van de kinderen met meer dan 15% significant toe. Een verbetering van de IAQ met een factor 2 veroorzaakt dus een opvallende verbetering in de schoolprestaties van kinderen.

Het zuiveren van de binnenlucht van gasvormige verontreinigingen is een veelbelovende methode om de IAQ te verbeteren en de ventilatie deels te vervangen. Verschillende methoden, inclusief absorptie en fotokatalyse, worden onderzocht. Uit onderzoek is gebleken dat de laatstgenoemde methode belangwekkende filterefficiënties kan opleveren, gedocumenteerd in relatie tot individuele chemicaliën in de lucht [Zhao en Yang, 2003]. Voor de typische menging van honderden chemicaliën die in binnenklimaten in erg kleine concentraties voorkomen, kan met een combinatie van de twee bovengenoemde methoden een zuiveringsefficiëntie van meer dan 80% haalbaar zijn [Fang et al., 2005]. Dat wil zeggen dat luchtzuivering de concentraties van chemicaliën in de lucht kan verminderen en daarmee de IAQ met een factor 5 kan verhogen. Het is echter duidelijk dat verder O&O van de technologieën nodig is. Verder onderzoek wordt aanbevolen om de zuiveringsefficiënties van de methoden te tonen bij aanwezigheid van typische bronnen van verontreiniging die in binnenruimten voorkomen.

Vele vulkanische uitbarstingen liggen ten grondslag aan het ontstaan van het landschap van Cappadocië. De as, modder en lava die bij deze uitbarstingen in het laat miocenische tijdperk (tien miljoen jaar geleden) afgezet werden, veranderden door contact met de lucht in zachte turfsteenformaties [1]. Door miljoenen jaren erosie is het landschap bijgeslepen tot het nu typerende feeëriek landschap van Cappadocië. Cappadocië heeft in de loop der eeuwen vele verschillende bevolkingen gekend. Al in de prehistorie werd de gestolde lava gewonnen en werden de markante tufsteenkegels uitgehakt tot woningen. Later in de geschiedenis werden uit het tufsteen ook kerken en kloosters gehouwen. Tevens zijn er in Cappadocië vele ondergrondse steden uitgehakt in het zachte tufsteen. De eerste ondergrondse steden dateren uit de 4e eeuw voor Christus. De steden dienden als toevluchtsoord voor de bevolking in tijden van gevaar. In rotszalen diep onder de grond konden grote molenstenen voor de ingangen worden gerold om aanvallers buiten te houden. In tijden van gevaar werden de ondergrondse steden voor langere tijd in gebruik genomen.

Het "Geelvinck Hinlopen Huis" is gesitueerd aan de 'gouden bocht' van de Amsterdamse Herengracht. Dit grachtenpand was ooit het huis van Albert Geelvinck en zijn vrouw Sara Hinlopen, die het huis in 1687 gebouwd hebben samen met het Koetshuis op de Keizersgracht. De constructie van het huis was een teken van rijkdom en welvaart, en bekroonde het huwelijk dat het koppel zeven jaar eerder aangegaan was. De Hinlopens hadden een fortuin verdiend als medeoprichters van de Oost Indië Compagnie en als handelaren van stoffen en andere goederen uit Oost Indië. De Geelvincks waren opgeklommen van schipper, tot schipeigenaar, tot leverancier van scheepsbenodigdheden, van piraten tot handelaren en uiteindelijk mede-eigenaar van een scheepscompagnie. Ten tijde van hun huwelijk waren beide families lid van de Stads Vaders en bekleedden verschillende leden van de

families publieke ambten. Aan huwelijken van patriciërsfamilies lagen vooral economische redenen ten grondslag. Ook dit huwelijk was een alliantie tussen twee families, met het doel om hun macht en rijkdom te behouden, uit te breiden en over te dragen aan de volgende generaties.

De fundering van het souterrain is uitgevoerd als een palenfundering. Dit is de enige manier waarop het mogelijk is om in de Amsterdamse grachtengordel te funderen. De palen zijn nog origineel, deze zijn gemaakt van hout. Over de houten funderingsbalken zijn houten randbalken aangebracht, hier weer overheen zijn de houten balken gelegd die de houten vloer ondersteunen. De houten vloer bestaat uit hardhouten planken. Waarschijnlijk zijn de buitenmuren van het souterrain van buiten naar binnen opgebouwd uit 600mm steen, afgewerkt met een stuc laag aan de binnenzijde. In de tijd dat het huis gebouwd is, bestonden er nog geen spouwmuren. Bij de renovatie van het huis is dit hoogstwaarschijnlijk niet veranderd, de buitenwanden van het souterrain zijn nog steeds ongeïsoleerd. De binnenmuren die het pand scheiden van de nevenpanden zijn evenals de buitenmuren steense muren, ook deze zijn vermoedelijk 600mm. De binnenmuren tussen de ruimten onderling zijn ook steense muren, aan beide zijden afgewerkt met een stuc laag. De plafonds zijn afgewerkt met een pleister laag met daarboven een houten balk laag constructie.

Vocht is de grootste oorzaak voor schade aan objecten. Zowel een te droge als een te vochtige omgeving is niet gunstig voor kunstcollecties. Materialen kunnen op verschillende manieren door vocht aangetast worden. Zo kunnen materialen mechanisch aangetast worden als gevolg van maatveranderingen door zwellen en krimpen. Ook uitdroging, biologische aantasting en chemische reacties zijn gevolgen van een te lage of een te hoge heersende relatieve luchtvochtigheid. Niet alle materialen worden op dezelfde manier door vocht aangetast. Organische materialen, zoals hout en papier, zijn het meest vatbaar voor aantasting door vocht. Bij een langdurig lage relatieve vochtigheid ($RV < 40\%$) kunnen organische objecten uitdrogen, waardoor ze erg broos worden en gemakkelijk beschadigen. Bij een langdurige hoge relatieve vochtigheid ($RV > 70\%$) is er kans op biologische aantasting. Bij sommige metalen, zoals ijzer, treedt corrosie op in een te vochtige omgeving. Het vocht brengt dan de chemische reactie op gang. Behalve de eis dat de luchtvochtigheid tussen bepaalde grenzen moet blijven, is het ook van belang dat de luchtvochtigheid constant blijft.

Onder invloed van licht treden allerlei degradatieprocessen op in materialen. Licht veroorzaakt vaak als eerste chemische reacties. Vooral papier en textiel degraderen snel bij blootstelling aan licht. Daarom is het belangrijk dat museale objecten niet te veel blootgesteld worden aan licht. Licht is op te delen in drie golflengtegebieden: ultraviolet licht met een golflengtegebied van 300-400 nm, zichtbaar licht met een golflengtegebied van 400-760 nm en infrarood licht met golflengtes boven 760 nm. Algemeen geldt dat hoe korter de golflengte is, hoe schadelijker de straling is voor kunstobjecten. Ultraviolet licht is dus het meest schadelijke deel van het licht. Er worden daarom speciale eisen gesteld aan het UV-gehalte van licht. Ook zichtbaar licht kan veel schade veroorzaken aan materialen. Het is daarom belangrijk om de verlichtingssterkte in het museum zo laag mogelijk te houden. Een verlichtingssterkte van 50 lux is in principe voldoende om de objecten goed te kunnen zien. Ook moet men proberen om de objecten niet langer dan nodig bloot te stellen aan licht.

De laatste tijd is er in de wereld van de behouders van het cultureel erfgoed veel opspraak over risico's waaraan waardevolle collecties worden blootgesteld. Jarenlang is er veel aandacht besteedt aan de ideale klimaatomstandigheden voor kunstcollecties. Echter recentelijk vindt er een nuancering plaats, wat nou als er bijvoorbeeld brand uitbreekt door de zeer geavanceerde klimaatinstallatie die

aangebracht is om het perfecte klimaat te garanderen, of wat gebeurt er met de collectie als de installatie plotseling uitvalt. Daarom wordt het van belang geacht dat wordt vastgesteld wat de waarde van de collectie is, en welke degradatie van de staat van de objecten toegestaan is. Tevens is het van belang dat er een inventarisatie wordt gemaakt van de risico's waaraan de collectie wordt blootgesteld. Het Instituut Collectie Nederland (ICN) doet uitgebreid onderzoek naar risicoanalyses voor museumcollecties. Het uitvoeren van een risicoanalyse is simpel gezegd het ontleden van gevaren voor schade of verlies. Het doel van een risicoanalyse is inzicht krijgen in risico's, welke risico's zijn er en hoe groot zijn deze?

Voordat er gebruik gemaakt kan worden van Random Stimulation is het belangrijk om duidelijk te weten met welk doel de techniek wordt toegepast. Allereerst dienen de criteria voor de ideeën vastgesteld te worden. Zijn de ideeën direct nodig om een probleem op te lossen, om een hypothese te onderzoeken of dienen de ideeën als basis om verder uit te werken? Als het doel waarvoor de techniek gebruik wordt duidelijk is, dient vervolgens willekeurig een stimulans gekozen te worden. Dit kan bijvoorbeeld gedaan worden door een zelfstandig naamwoord te kiezen uit een woordenboek of uit een vooraf opgestelde woordenlijst. Ook bestaat er software voor het willekeurig genereren van woorden. Dit woord wordt vervolgens gebruikt als beginpunt (initiële stimulans) van een brainstorm over het probleem. Er dient een link gelegd te worden tussen de stimulans en het originele probleem, hiervoor zijn verschillende methoden ontwikkeld. Een van deze methoden is de 'force-fit'-methode. Na een uitgebreide beschrijving van de stimulans (hoe wordt het gebruikt, hoe groot is het etc.) wordt een manier bedacht om de principes van de stimulans toe te passen op het probleem.

Een andere meting is verricht in gerenoveerde flatgebouwen in Frankrijk (55 woningen, 5 gebouwen) met een vochtgerregelde hybride ventilatie. Deze meting is verricht gedurende 2 jaar, waarbij er elke minuut een meting werd verricht (1 miljoen punten per dag). De analyse van de volgende grafieken laat duidelijk zien hoe vraaggestuurde ventilatie kan samengaan met de binnenluchtkwaliteit en energiebeheersing. Als één gebouw bekeken wordt, dan is ook hier de respons te zien op de verandering in behoefte van de individuele roosters gedurende alle seizoenen. De gemiddelde opening in de zomer is groter dan de gemiddelde opening in de winter. Het energiemangement is effectief op woningniveau, door het reduceren van de gemiddelde stromingen in de koude perioden. Als er gekeken wordt naar een groter aantal appartementen, dan is de totale stroming kleiner en minder variërend als het aantal appartementen toeneemt (de behoeften zijn niet gelijk en komen ook niet tegelijkertijd voor in de verschillende woningen). Dit is het belangrijkste kenmerk voor energiemangement van vraaggestuurde ventilatie.

Een andere meting is verricht in gerenoveerde flatgebouwen in Frankrijk (55 woningen, 5 gebouwen) met een vochtgerregelde hybride ventilatie. Deze meting is verricht gedurende 2 jaar, waarbij er elke minuut een meting werd verricht (1 miljoen punten per dag). De analyse van de volgende grafieken laat duidelijk zien hoe vraaggestuurde ventilatie kan samengaan met de binnenluchtkwaliteit en energiebeheersing. Als één gebouw bekeken wordt, dan is ook hier de respons te zien op de verandering in behoefte van de individuele roosters gedurende alle seizoenen. De gemiddelde opening in de zomer is groter dan de gemiddelde opening in de winter. Het energiemangement is effectief op woningniveau, door het reduceren van de gemiddelde stromingen in de koude perioden. Als er gekeken wordt naar een groter aantal appartementen, dan is de totale stroming kleiner en minder variërend als het aantal appartementen toeneemt (de behoeften zijn niet gelijk en komen ook niet tegelijkertijd voor in de verschillende woningen). Dit is het belangrijkste kenmerk voor

energiemanagement van vraaggestuurde ventilatie.

De vervanging van de pre-filters door hoge efficiëntie filters in bestaande ventilatiesystemen zal ongetwijfeld een stationaire afname en een verlaging van de luchttoevoer teweegbrengen. Dit kan het comfortniveau in de ruimte beïnvloeden. De stationaire afname en de luchttoevoer van de AHU luchtventilatoren voor verschillende filters zijn weergegeven in figuur 10. Hieruit kan afgelezen worden dat hogere efficiëntie filters een hogere stationaire afname hebben. De stationaire afname van een pre-filter was klein, daar waar de 60-90% filters vergelijkbaar waren met elkaar. De HEPA filter had de hoogste stationaire afname, welke ongeveer vijf keer meer was dan de stationaire afname van een pre-filter. Verbazingwekkend genoeg laat de AHU luchtventilator een grote tolerantie zien voor de verhoging van de stationaire afname. De luchttoevoer nam slechts licht af. Het psychometrische ontwerp van het ventilatiesysteem werd niet beïnvloed. Dit komt waarschijnlijk door de hoge stationaire afname van het gehele luchtkanaaltoevoersysteem. Economische overwegingen zijn een manier om te bepalen wat de uitvoerbaarheid van dergelijke ventilatiesystemen is.

Spraak is een audiosignaal met een karakteristiek spectrum dat met een zekere regelmaat, het spraakritme, wordt geproduceerd. Dit kan worden opgevat als een signaal waarvan de intensiteit in het spraakritme fluctueert. De fluctuaties in intensiteit van het originele spraaksignaal worden beïnvloed door het overdrachtssysteem: de zaal. De verandering van het originele signaal door de zaal is maatgevend voor de spraakverstaanbaarheid. Met spraakverstaanbaarheid wordt dus aangegeven hoe goed spraak in een ruimte kan worden verstaan. De spraakverstaanbaarheid is afhankelijk van het achtergrondgeluidniveau, de nagalmtijd van de ruimte en de vorm van de ruimte. Er zijn verschillende parameters om de spraakverstaanbaarheid te kwantificeren, de Speech Transmission Index (STI) is er hier één van. De STI wordt berekend over de frequentiebanden van 125 Hz tot 8000 Hz, waarbij iedere frequentieband een afzonderlijke weging heeft. Deze STI kan bepaald worden uit een impulsresponsie. Bij een spraakverstaanbaarheidsmeting is het van belang dat de signaal-ruis-afstand boven de 15 dB ligt.

Vroeger werden de spoorrails met lasplaten aan elkaar gezet waardoor de railleinden onder invloed van temperatuursveranderingen vrij konden bewegen. Dit voorkwam de opbouw van langskrachten en daarmee het gevaar van uitknikken (spatten) van het spoor bij hoge temperaturen, alsmede het breken van spoorstaven onder invloed van trek bij lage temperaturen. Het grote nadeel van deze oplossing vormden de voegen die bij wielpassage tot het bekende 'kedeng kedeng' leiden. De daarmee gepaard gaande dynamische belastingen kunnen oplopen tot enkele malen de statische waarde en dat veroorzaakt een snelle aftakeling van de spoorligging en schade aan de wielen. Deze effecten nemen progressief toe met de snelheid. Daarom is men eind jaren zestig begonnen met de invoering van voegloos spoor, waarbij de rails in principe tot een oneindig lange streng aan elkaar gelast worden. De irritante voegen en de daarmee verbonden hoge dynamische belastingen zijn dan verdwenen, maar daarvoor in de plaats worden nu grote langskrachten geïntroduceerd.

Vulkanisme aan de randen van continenten is het gevolg van het onderschuiven van de ene plaat onder de andere, zoals bij de Andes. Dat wordt subductie genoemd. De ndergeschoven plaat wordt zo diep in de aardmantel weggeduwd dat hij gaat smelten, waardoor magma ontstaat. Dat magma is lichter dan de omringende gesteenten en daarom stijgt het op, tot het het oppervlak bereikt. Dan krijg je vulkanen. Ook bij eilandbogen als de Bovenwindse Eilanden van de Nederlandse Antillen gebeurt dit. In al deze gevallen bewegen de platen naar elkaar toe. Maar het vulkanisme in Midden-Afrika,

zoals bij de recente eruptie van de Nyiragongo die Goma verwoestte, is juist het gevolg van het feit dat daar platen uiteenwijken. Dwars door Afrika loopt de Oost-Afrikaanse slenk, een enorme breukzone waarlangs Oost-Afrika langzaam van de rest wil afdrijven. Bij het opengaan van die breuken welt basaltisch magma diep uit de aardmantel omhoog, als bloed uit een wond. Dit is hetzelfde vulkanisme dat we aantreffen op IJsland en op de Azoren.

Alle gebouwen zijn kwetsbaar voor grote terroristische aanslagen, zoals die van 11 september 2001 op de wtc-torens in New York. Daar valt niet tegen te bouwen, omdat de toekomstige terroristische mogelijkheden nog niet bekend zijn bij het ontwerp. Bij de bouw van het wtc vlogen bijvoorbeeld nog geen wide-body-vliegtuigen rond. De torens van het wtc waren daar niet op geconstrueerd, maar bleken toch nog een groot incasseringsvermogen te hebben. Ik herinner mij de woorden van de constructeur van de gebouwen, Leslie Robertson, tijdens een bezoek aan Delft, na de aanslag op het wtc in 1993. Door de aanslag waren een aantal kolommen weggeslagen en Leslie vertelde dat hij het gebouw opnieuw had doorgerekend, waaruit bleek dat het ook de impact van een Boeing 707 kon hebben. De torens van respectievelijk 417 en 415 meter hoog hadden een opmerkelijke gevelconstructie, die bestond uit stalen kolommen van zo'n veertig centimeter breed, bekleed met brandbestendig materiaal. Daartussen zaten de ramen van slechts zestig centimeter breed.

Multimedia heeft heel wat te bieden vanuit het oogpunt van het taakgericht onderwijs. Volgens deze visie leert men een taal beter als men die taal actief moet gebruiken en er opdrachten mee moet uitvoeren. Taakgericht onderwijs sluit aan bij de manier waarop jonge kinderen hun moedertaal leren: niet door taal in stukjes te hakken - woordenschat, grammatica, ... - maar wel door taal op globale wijze en in concrete situaties te interpreteren en te verwerken. Onder interessante multimedia in het kader van taakgericht Taalonderwijs verstaan wij hier niet de zogenaamde multimediale onderwijspakketten met klassieke taal oefeningen, waarbij enkel een oude manier van leren aantrekkelijker gemaakt wordt. Wij hebben eerder de multimediapakketten voor ogen die de vrijetijdsmarkt overspoelen. Veel van deze producten kunnen we vatten onder de noemer adventure game. Binnen een raamverhaal wordt de gebruiker geconfronteerd met diverse probleemsituaties die hij moet oplossen. Hiervoor zijn doorgaans bepaalde objecten nodig die in het verhaal verborgen zitten.

In het kader van wereldwijd marien onderzoek vormt de Equatoriale en Zuidelijke Atlantische Oceaan een ideaal 'natuurlijk laboratorium' om het klimaat uit het geologische verleden te bestuderen, omdat deze regio is beïnvloed door een grote verscheidenheid aan klimaatgestuurde processen: Van Noord naar Zuid omvat deze oceaan sterk verschillende klimatologische gebieden: van de tropen tot de polen onderscheiden we achtereenvolgens de intertropische, subtropische en subantarktische frontale systemen met hun zones van hoge primaire productiviteit. Bovendien vindt er uitwisseling plaats van watermassa's uit de Noordelijke Atlantische Oceaan en Zuidelijke Oceaan. In het westen en oosten is de Zuidelijke Atlantische Oceaan begrensd door de Zuid Amerika en Afrika vanwaar grote hoeveelheden terrestrische sedimenten worden aangevoerd via de zogenaamde 'stofzones' van de Sahara, de Sahel en de Patagonische woestijnen. Aanvoer van riviermateriaal wordt verzorgd door grote rivieren. De Mid- Atlantische Rug met haar actieve spreiding van de oceaانبodem deelt de Zuid- Atlantische Oceaan in een westelijk en oostelijk hoofdbekken, die op hun beurt zelf worden weer onderverdeeld door submariene ruggen.

De gemeente Wageningen ligt in een gevarieerd landschap met hoge natuurlijke kwaliteiten. De natuurwaardenkaart Wageningen, die dankzij de natuurkennis van de leden van de Wageningse natuurorganisaties in 2001 tot stand kwam, toonde aan dat deze landschappen ook een hoge natuurkwaliteit bezitten. Wageningen is rijk aan steenuilen in de Wageningse Eng en het Binnenveld, de kwartelkoning en porseleinhoen broeden in goede jaren pal voor de stad in de uiterwaarden, in en buiten de stad bloeien verschillende soorten orchideeën, bosanemonen groeien langs de bermen van de noordelijke uitvalswegen, ringslang en hazelworm komen veel voor langs de bergrand, de kamsalamander zit in de uiterwaarden en in poeltjes in de Nude, de sleedoornpage wordt gezien in alle buitenwijken en overal in de stad zitten diverse soorten vleermuizen. De bijzondere soorten en gebieden worden door de Flora- en Faunawet en de onlangs in werking getreden Natuurbeschermingswet wettelijk beschermd. Voor gebieden van de Ecologische Hoofdstructuur geldt al langer dat zij via bestemmingsplannen moeten worden veiliggesteld.

Bij het beschermen van natuur ligt een sterke nadruk op het instrument bestemmingsplan. Bij het opstellen van bestemmingsplannen moet de gemeente rekening houden met de uitvoerbaarheid van Natuurbeschermingswet en Flora- en faunawet. En de planhiërarchie van de Wet op de Ruimtelijke Ordening verplicht gemeenten om gebieden van de Ecologische Hoofdstructuur ruimtelijk veilig te stellen. Gewenst is dat een gemeente niet alleen uitgaat van het toepassen en handhaven van deze weten regelgeving, maar streeft naar een zorgvuldige omgang met actuele en potentiële natuurwaarden. Natuurbehoud staat gelijk aan je verantwoordelijkheid nemen. Dat moet leiden tot een constructieve, pro-actieve benadering van (wettelijk beschermde) natuurwaarden. Voorkomen is immers beter dan genezen. Een gemeentelijke visie op natuurbeleid is daarbij onontbeerlijk. Deze handreiking geeft hiertoe hulpmiddelen in de vorm van een natuurwaardenkaart en een natuurkansenkaart. Voor het opstellen van dergelijke kaarten is onderzoek naar natuurwaarden nodig. Ook hiervoor geeft deze handreiking adviezen. De adviezen gaan verder dan hetgeen verplicht is vanuit het natuurbeschermingsrecht zelf.

Vanaf de Oostenrijkse periode was men weliswaar begonnen met de uitbouw van een net van kanalen en teenwegen. Meestal verbonden deze de belangrijkste steden. Alleen plattelandsgemeenten die toevallig langs het traject lagen profiteerden van deze vervoersmodi. Voor de reizigers werden diligencediensten ingelegd en voor het goederenvervoer ontstonden zogenaamde 'messengeries' of karrenvrachtdiensten. Met de komst van de spoorweg veranderde de verkeerseconomie aanzienlijk. België was het eerste land op het continent dat over een spoorwegnet beschikte. Op 1 mei 1834 keurde het parlement een wet goed voor de aanleg van 'een stelsel van ijzeren wegen'. De opstellers van de eerste plannen hadden vooral een verbinding voor ogen die het jonge koninkrijk een verbinding bezorgde tussen het Duitse achterland en de Belgische havens. Een stervormig net met Mechelen als centraal punt verbond in het noorden Antwerpen. In het westen legde de Staat een lijn aan naar Gent, Brugge en Oostende. In het zuiden liep een lijn naar Brussel en in het oosten naar Leuven en Luik. Deze lijn zou later naar Aken worden verlengd.

De Europese eenmaking zorgde ervoor dat we het nog nauwelijks merken als we de landsgrenzen overschrijden. Dit was ooit anders. In de 19de eeuw haalden regeringen aanzienlijke inkomsten uit allerlei in- en uitvoertaksen. Verder trachtten zij de binnenlandse markt zoveel mogelijk te beschermen. Om goederen te taxeren werden aan de grens gigantische spoorweginfrastructuren aangelegd. Alle goederenverkeer moest minutieus worden gecontroleerd. Met dat doel werden

uitgestrekte emplacementen aangelegd. Het station Hamont bijvoorbeeld bezat een spoorwegbundel met 26 sporen met een totale lengte van 12 km. De spoorweg- en douaneactiviteiten verschaften werk aan 360 man. In het station Essen bouwde de Staat een tot op heden bewaard gebleven quarantainestel. In Weelde-Merksplas bouwde het Ministerie van Financiën nabij het station enkele woningen voor douanepersoneel. In Vlaanderen stonden er grensstations te Oostende, Zelzate, De Klinge, Essen, Weelde-Merksplas, Achel, Hamont en Lanaken. De grensstations hadden in regel twee dienstwoningen, één voor de stationschef en één voor de ontvanger van belastingen.

De Staatsspoorwegen maakten een onderscheid tussen een station, een halte of een stopplaats. Een station had een uitgebreide infrastructuur voor goederenafhandeling. In steden en langs belangrijke spoorwegknooppunten stonden stations 1ste en 2de klasse. Alle treinen hielden er halt. Dorpen hadden een station 3de of 4de klasse, waar enkele lokale treinen stopten. Kleine lokaliteiten hadden slechts een halte. Een halte had meestal geen uitgebouwde goedereninfrastructuur, wel kon men er colli's afgeven of ophalen. Een stopplaats was gewoonweg een perron aan een veel gebruikte weg ergens tussen twee stations. De dienstregeling beperkte zich tot enkele treinen 's morgens en 's avonds. Het station maakte een einde aan een autarkische economie. Landbouwers konden hun producten kwijt op markten in de stad. Het hout werd als energiedrager vervangen door steenkool. Baksteen uit Boom, marmer uit Rance, kasseien uit Quenast of arduin uit Zinnik konden in het hele land worden afgezet. Vanuit de Kempen stuurde men mijnhout naar de steenkoolindustrie in Luik en Henegouwen.

In dit onderzoek is door middel van metingen in 92 woningen rondom de luchthaven Schiphol getracht inzicht te krijgen in de invloed van geluidsisolatie van woningen en eventueel veranderd ventilatiegedrag wegens geluid van buiten, op de concentraties luchtverontreiniging in woningen en het gehalte microbiele componenten in huisstof. In de lucht van de woonkamer werd de concentratie fijn stof, de concentratie roet, de concentratie Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen (PAK), de concentratie Vluchtige Organische Koolwaterstoffen (VOK) en de concentraties NO₂ bepaald. Verder werd in huisstof afkomstig van de woonkamervloer van deze woningen het gehalte endotoxinen (afkomstig van gram-negatieve bacterien), het gehalte EPS(pen/asp) (afkomstig van schimmels), het gehalte beta(1,3)glucaan (ook afkomstig van schimmels) en het gehalte huisstofmijtallergeen (Der p 1) bepaald. Voor alle gemeten componenten werden geen statistisch significant aantoonbare verschillen gevonden tussen woningen met en woningen zonder aangebrachte geluidsisolatie. In het onderzoek was ook gevraagd of mensen minder gebruik maakten van ventilatiemogelijkheden wegens geluid van buiten.

Appendix 6. Meetprotocol

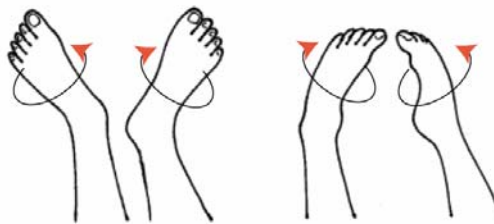
Voor beide meetsessie is hetzelfde meetprotocol aangehouden. Echter, bij meetsessie 1 bleef de ruimtetemperatuur constant.

Tijd	Activiteit
7.45u	Meetkamer naar 17°C Koelen
8.15u	Aankomst proefpersoon
8.20u	Instructies geven aan proefpersoon en verklaring voor deelname laten ondertekenen
8.25u	Proefpersoon laten omkleden
8.30u	Proefpersoon exercitie (steppen) laten uitvoeren gedurende 5 minuten
8.35u	Aanbrengen rectale sensor (door proefpersoon zelf)
8.40u	Lengte en gewicht proefpersoon bepalen in EET-kamer
8.42u	4 huidplooien en omtrekken meten in meetruimte.
8.45u	Aanbrengen huidtemperatuursensoren
9.15u	Starten met verwarmen naar 25°C Invullen eerste vragenlijst
9.45u	Invullen tweede vragenlijst (ruimtetemperatuur is 18°C)
10.15u	Invullen derde vragenlijst (ruimtetemperatuur is 19°C)
10.45u	Invullen vierde vragenlijst (ruimtetemperatuur is 20°C)
11.15u	Invullen vijfde vragenlijst (ruimtetemperatuur is 21°C)
11.25u	Pauze (ruimtetemperatuur is gelijk aan temperatuur in laboratorium)
11.35u	Hervatten metingen
11.45u	Invullen zesde vragenlijst (ruimtetemperatuur is 22°C)
12.15u	Invullen zevende vragenlijst (ruimtetemperatuur is 23°C)
12.45u	Invullen achtste vragenlijst (ruimtetemperatuur is 24°C)
13.15u	Invullen negende vragenlijst (ruimtetemperatuur is 25°C)
13.25u	Lunch in meetruimte
13.45u	Invullen tiende vragenlijst (ruimtetemperatuur is 24°C)
14.15u	Invullen elfde vragenlijst (ruimtetemperatuur is 23°C)
14.45u	Invullen twaalfde vragenlijst (ruimtetemperatuur is 22°C)
14.55u	Pauze (ruimtetemperatuur is gelijk aan temperatuur in laboratorium)
15.05u	Hervatten metingen
15.15u	Invullen dertiende vragenlijst (ruimtetemperatuur is 21°C)
15.45u	Invullen veertiende vragenlijst (ruimtetemperatuur is 20°C)
16.15u	Invullen vijftiende vragenlijst (ruimtetemperatuur is 19°C)
16.45u	Invullen zestiende vragenlijst (ruimtetemperatuur is 18°C)
17.15u	Invullen zeventiende vragenlijst (ruimtetemperatuur is 17°C)
17.25u	Einde metingen, verwijderen meetsensoren
17.35u	Einde meetsessie

Appendix 7. Bewegingsoefening

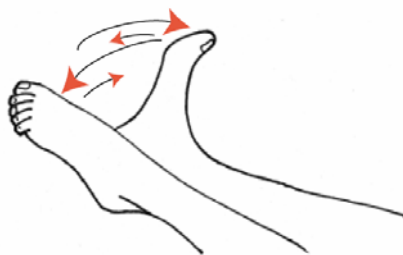
Ten behoeve van het stimuleren van de huiddoorbloeding dienen de volgende oefeningen elk half uur uitgevoerd te worden.

1. Het ronddraaien van de enkels, de oefening dient 5 maal uitgevoerd te worden in beide richtingen.



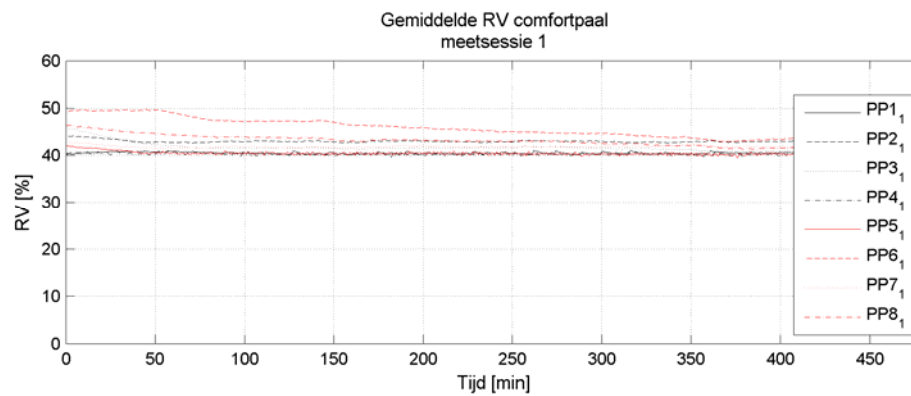
2. Het strekken en plooiën van de voeten, deze oefening dient 10 maal uitgevoerd te worden.

Bij het optillen van de tenen dient de hiel op de vloer te blijven. Bij het optillen van de hiel dient de bal van de voet plat op de vloer te blijven.

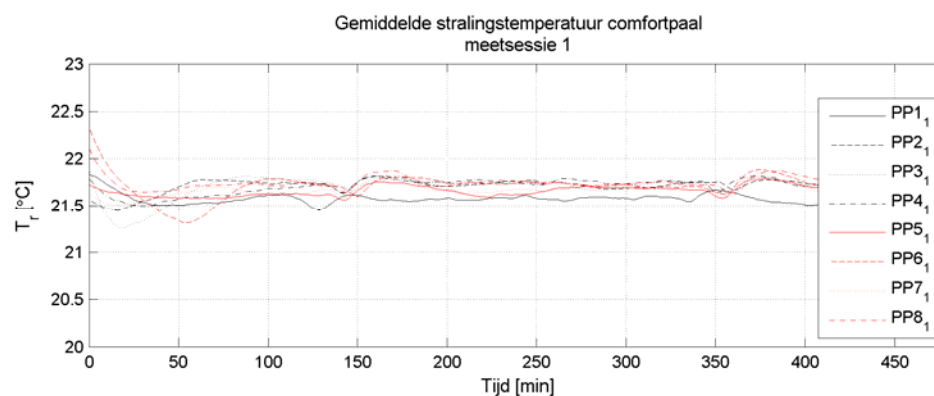


Appendix 8. Gemeten omgevingsparameters

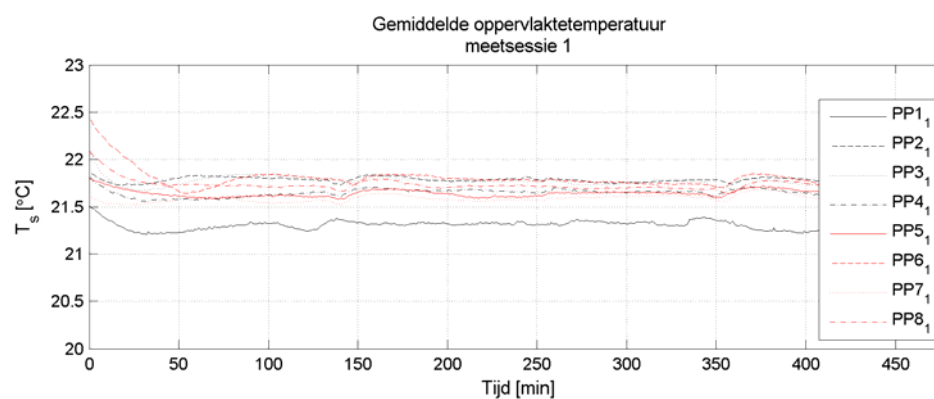
8.1 Meet sessie 1



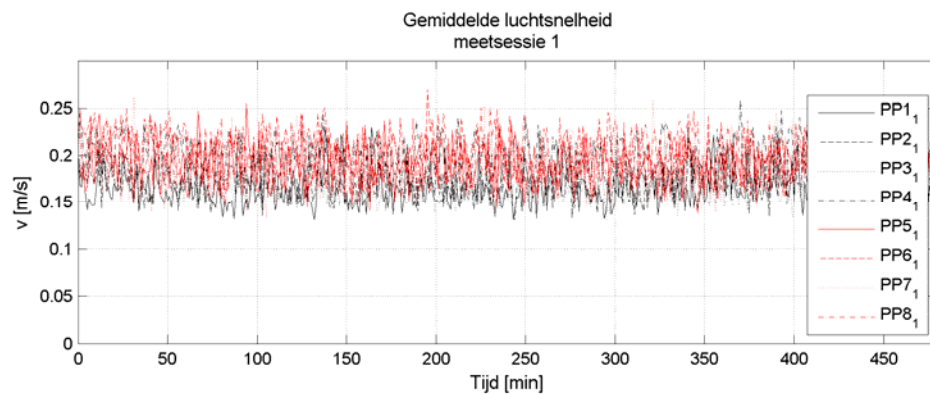
Figuur A.1: Verloop gemiddelde RV nabij comfortpaal meet sessie 1



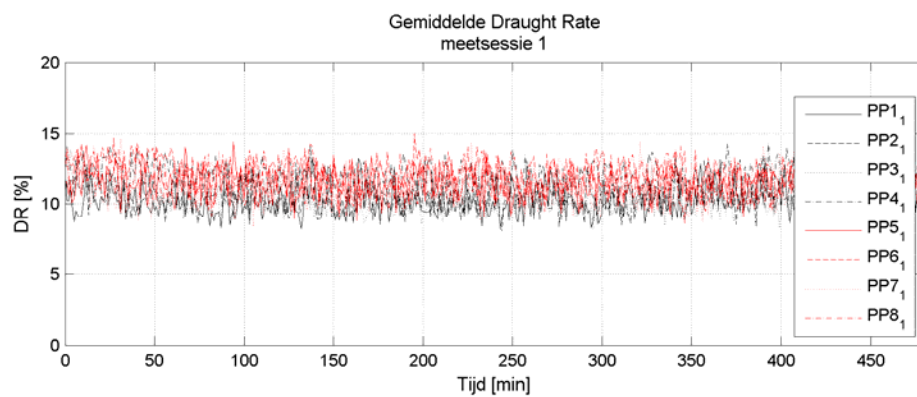
Figuur A.2: Verloop gemiddelde stralingstemperatuur meet sessie 1



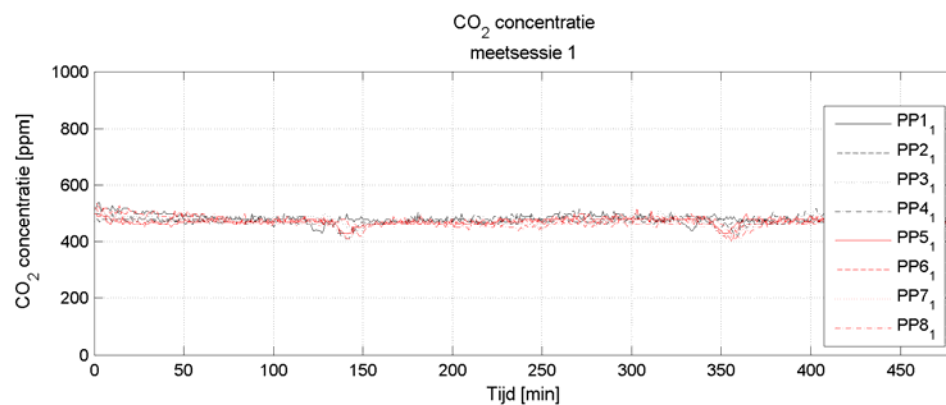
Figuur A.3: Verloop gemiddelde stralingstemperatuur meet sessie 1



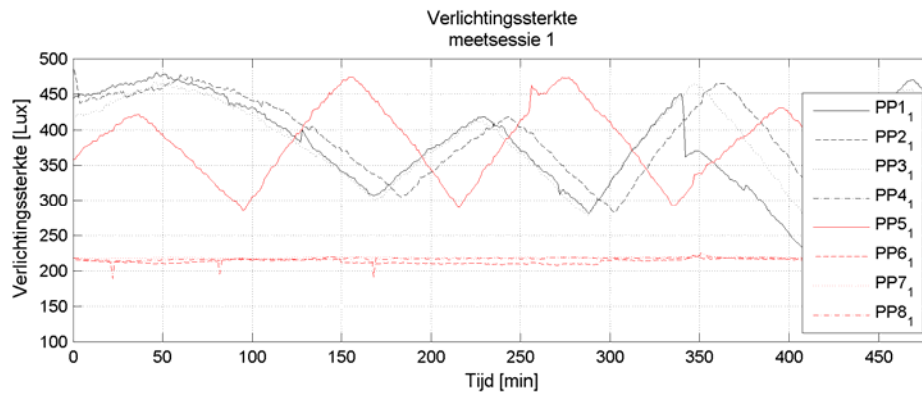
Figuur A.4: Verloop gemiddelde luchtsnelheid nabij comfortpaal meet sessie 1



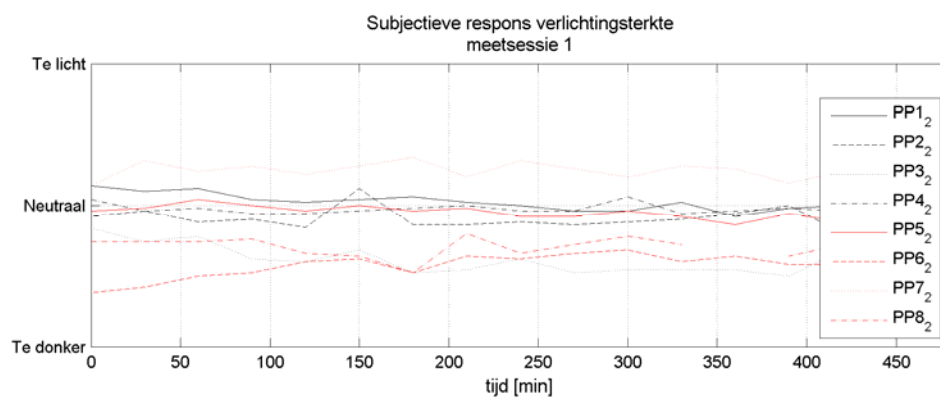
Figuur A.5: Verloop gemiddelde luchtsnelheid nabij comfortpaal meet sessie 1



Figuur A.6: Verloop CO₂ concentratie meet sessie 1



Figuur A.7: Verloop verlichtingssterkte meet sessie 1



Figuur A.8: Verloop subjectieve respons verlichtingssterkte meet sessie 2

In onderstaande tabellen zijn de gemiddelde resultaten weergegeven van meet sessie 1. Voor deze meet sessie zijn de gemiddelde waarden over de hele periode weergegeven, omdat hier niet gevarieerd is in de temperatuurinstellingen.

Tabel A.5: Gemiddelde resultaten meet sessie 1, luchttemperatuur, stralingstemperatuur en relatieve vochtigheid

	mean $\pm$ stdev min - max		
	Luchttemperatuur [°C]	Stralingstemperatuur [°C]	Relatieve vochtigheid [-]
Comfortpaal h=0,1m	21,62 $\pm$ 0,08 21,36 – 21,76	21,63 $\pm$ 0,06 21,45 – 21,77	41,92 $\pm$ 0,59 41,11 – 43,86
Comfortpaal h=0,6m	21,51 $\pm$ 0,08 21,25 – 21,65	-	42,24 $\pm$ 0,62 41,44 – 44,19
Comfortpaal h=1,1m	21,48 $\pm$ 0,08 21,22 – 21,62	21,69 $\pm$ 0,05 21,54 – 21,89	41,80 $\pm$ 0,59 41,00 – 43,65
Comfortpaal h=1,7m	21,49 $\pm$ 0,08 21,23 – 21,63	-	42,10 $\pm$ 0,57 41,31 – 43,80
Tafel	21,55 $\pm$ 0,08 21,29 – 21,69	21,73 $\pm$ 0,05 21,60 – 21,92	41,80 $\pm$ 0,55 40,99 – 43,55
Kast	21,78 $\pm$ 0,08 21,52 – 21,92	-	42,70 $\pm$ 0,51 41,92 – 44,21

Tabel A.6: Gemiddelde resultaten meetsessie 1, oppervlaktetemperatuur

	mean $\pm$ stdev min – max
	Oppervlaktetemperatuur [°C]
Wand rechts	21,68 $\pm$ 0,04 21,62 – 21,92
Wand links	21,77 $\pm$ 0,04 21,73 – 22,04
Wand achterzijde	21,52 $\pm$ 0,06 21,46 – 21,91
Wand deurzijde	21,62 $\pm$ 0,06 21,56 – 22,05
Plafond	21,45 $\pm$ 0,06 21,45 – 21,63
Vloer	21,90 $\pm$ 0,03 21,80 – 21,97

Tabel A.7: Gemiddelde resultaten meetsessie 1, luchtsnelheid en turbulentie-intensiteit

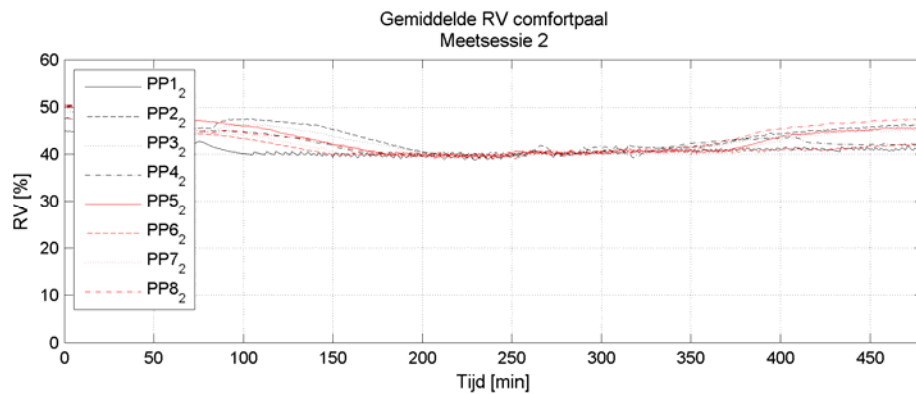
	mean $\pm$ stdev min - max	
	Luchtsnelheid [m/s]	Draught Rate [%]
Comfortpaal h=0,1m	0,23 $\pm$ 0,02* 0,18 – 0,29	13,37 $\pm$ 0,90 11,35 – 16,32
Comfortpaal h=0,6m	0,19 $\pm$ 0,01* 0,17 – 0,22	11,65 $\pm$ 0,52 10,28 – 13,32
Comfortpaal h=1,1m	0,18 $\pm$ 0,01* 0,16 – 0,20	10,74 $\pm$ 0,39 9,68 – 11,76
Comfortpaal h=1,7m	0,14 $\pm$ 0,01* 0,12 – 0,17	8,96 $\pm$ 0,43 7,47 – 10,39
Onder plafondventilator	0,61 $\pm$ 0,04* 0,51 – 0,75	27,46 $\pm$ 1,40 23,93 – 31,86

* Luchtsnelheden die kleiner zijn dan 0,05 m/s vallen buiten de betrouwbaarheid van de hete bol anemometer

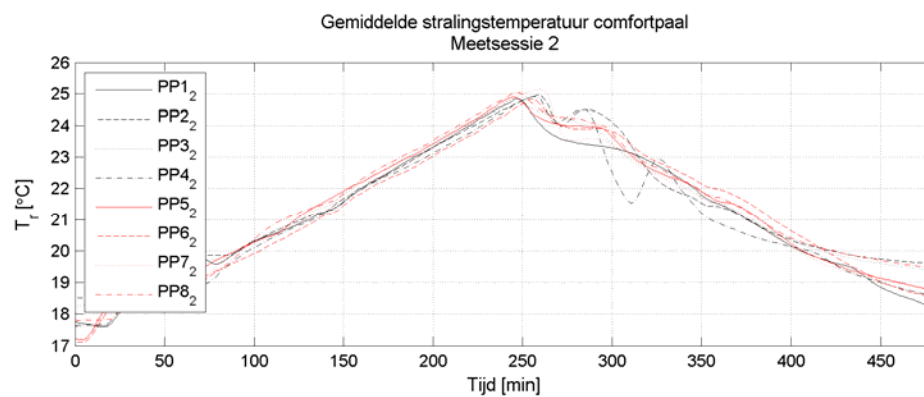
Tabel A.8: Gemiddelde resultaten meetsessie 1, CO₂ concentratie en verlichtingssterkte

	mean $\pm$ stdev min – max	
	CO ₂ concentratie [ppm]	Verlichtingssterkte [Lux]
Tafel	471,78 $\pm$ 9,44 436,99 – 509,77	337,92 $\pm$ 17,23 301,72 – 370,86

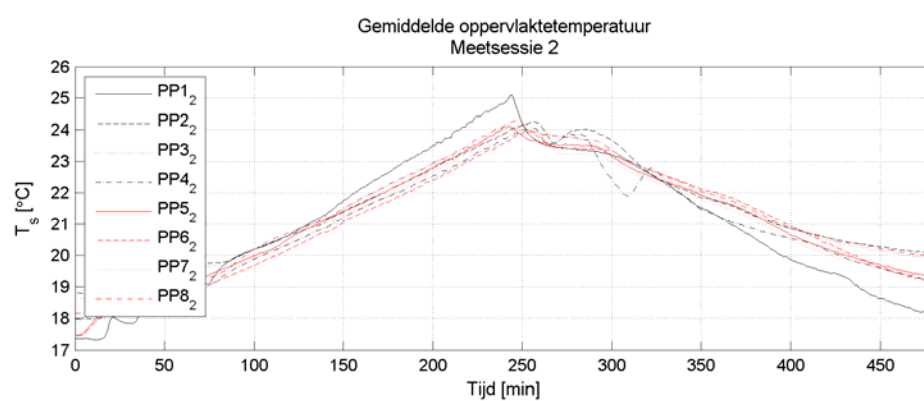
8.2 Meetsessie 2



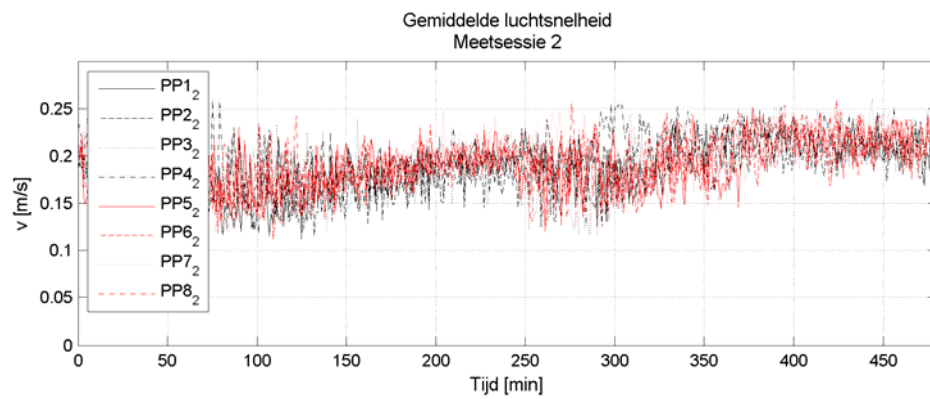
Figuur A.9: Verloop gemiddelde RV nabij comfortpaal meetsessie 2



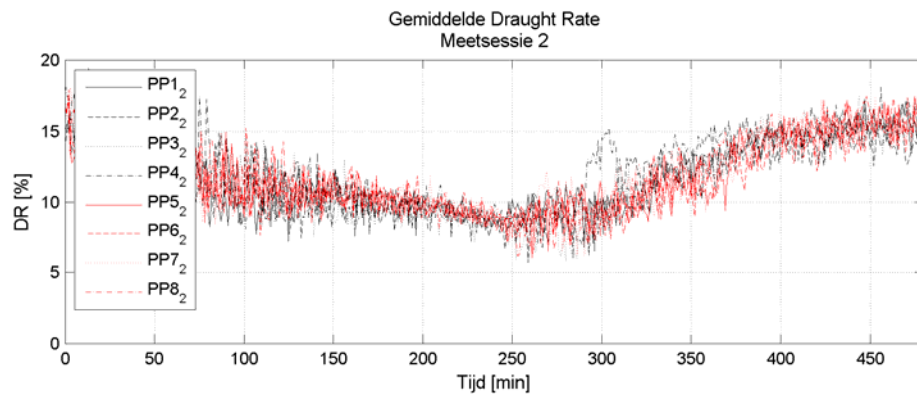
Figuur A.10: Verloop gemiddelde stralingstemperatuur meetsessie 2



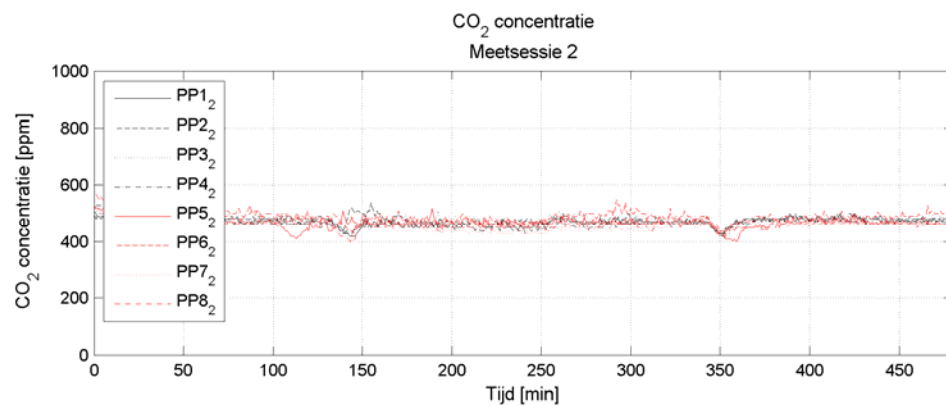
Figuur A.11: Verloop gemiddelde stralingstemperatuur meetsessie 2



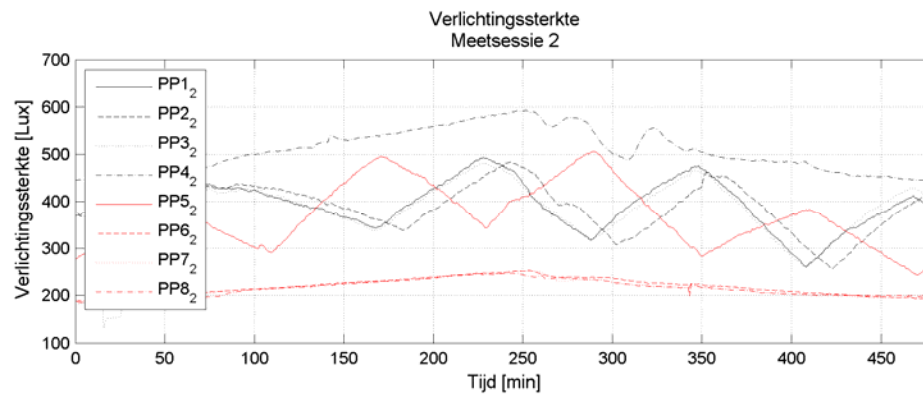
Figuur A.12: Verloop gemiddelde luchtsnelheid nabij comfortpaal meetsessie 2



Figuur A.13: Verloop gemiddelde luchtsnelheid nabij comfortpaal meetsessie 2



Figuur A.14: Verloop CO₂ concentratie meetsessie 2



Figuur A.15: Verloop verlichtingssterkte meetsessie 2

In onderstaande tabellen zijn de gemiddelde resultaten weergegeven van meetsessie 2. Voor meetsessie 2 zijn de waarden weergegeven op het moment waarop de enquêtes ingevuld dienden te worden, om zo een beeld te verkrijgen van de verschillen tussen de proefpersonen.

Tabel A.9: Gemiddelde resultaten meetsessie 2, luchttemperatuur ($t=0 - t=120$)

	mean $\pm$ stdev min - max				
	t=0	t=30	t=60	t=90	t=120
Comfortpaal h=0,1m	17,45 $\pm$ 0,53 16,89 – 18,37	18,52 $\pm$ 0,35 18,01 – 19,02	19,47 $\pm$ 0,47 18,55 – 19,80	20,07 $\pm$ 0,14 19,80 – 20,20	20,94 $\pm$ 0,18 20,69 – 21,28
Comfortpaal h=0,6m	17,33 $\pm$ 0,53 16,77 – 18,25	18,40 $\pm$ 0,35 17,89 – 18,91	19,06 $\pm$ 0,47 18,44 – 19,68	19,96 $\pm$ 0,14 19,69 – 20,08	20,83 $\pm$ 0,18 20,58 – 21,17
Comfortpaal h=1,1m	17,30 $\pm$ 0,53 16,74 – 18,23	18,37 $\pm$ 0,35 17,87 – 18,88	19,03 $\pm$ 0,47 18,41 – 19,65	19,93 $\pm$ 0,14 19,66 – 20,05	20,80 $\pm$ 0,18 20,55 – 21,14
Comfortpaal h=1,7m	17,29 $\pm$ 0,54 16,73 – 18,22	18,37 $\pm$ 0,35 17,86 – 18,88	19,03 $\pm$ 0,47 18,40 – 19,66	19,93 $\pm$ 0,14 19,66 – 20,06	20,81 $\pm$ 0,18 20,56 – 21,15
Tafel	17,35 $\pm$ 0,54 16,79 – 18,28	18,43 $\pm$ 0,35 17,92 – 18,94	19,09 $\pm$ 0,47 18,46 – 19,71	19,99 $\pm$ 0,14 19,72 – 20,11	20,86 $\pm$ 0,18 20,61 – 21,21
Kast	17,55 $\pm$ 0,54 16,98 – 18,48	18,63 $\pm$ 0,36 18,12 – 19,14	19,30 $\pm$ 0,47 18,67 – 19,93	20,21 $\pm$ 0,14 19,94 – 20,33	21,09 $\pm$ 0,19 20,84 – 21,44

Tabel A.10: Gemiddelde resultaten meetsessie 2, luchttemperatuur (t=150 – t=270)

	mean ± stdev min - max				
	t=150	t=180	t=210	t=240	t=270
Comfortpaal h=0,1m	21,90 ± 0,16 21,70 – 22,13	22,82 ± 0,20 22,54 – 23,13	23,83 ± 0,20 23,51 – 24,19	24,83 ± 0,24 24,51 – 25,15	23,79 ± 0,38 23,18 – 24,19
Comfortpaal h=0,6m	21,79 ± 0,16 21,59 – 22,01	22,71 ± 0,20 22,43 – 23,02	23,72 ± 0,20 23,40 – 24,08	24,73 ± 0,24 24,40 – 25,05	23,68 ± 0,38 23,07 – 24,08
Comfortpaal h=1,1m	21,77 ± 0,16 21,56 – 21,99	22,69 ± 0,20 22,40 – 23,00	23,70 ± 0,20 23,38 – 24,06	24,70 ± 0,24 24,37 – 25,02	23,66 ± 0,38 23,05 – 24,06
Comfortpaal h=1,7m	21,78 ± 0,16 21,57 – 22,00	22,70 ± 0,20 22,42 – 23,01	23,72 ± 0,20 23,39 – 24,08	24,72 ± 0,24 24,39 – 25,05	23,67 ± 0,38 23,06 – 24,08
Tafel	21,83 ± 0,16 21,63 – 22,05	22,76 ± 0,20 22,47 – 23,06	23,77 ± 0,20 23,45 – 24,13	24,78 ± 0,24 24,45 – 25,10	23,73 ± 0,38 23,12 – 24,13
Kast	22,07 ± 0,16 21,87 – 22,30	23,01 ± 0,20 22,72 – 23,32	24,03 ± 0,20 23,71 – 24,40	25,05 ± 0,25 24,72 – 25,38	23,99 ± 0,39 23,37 – 24,40

Tabel A.11: Gemiddelde resultaten meetsessie 2, luchttemperatuur (t=300 – t=420)

	mean ± stdev min - max				
	t=300	t=330	t=360	t=390	t=420
Comfortpaal h=0,1m	23,08 ± 0,76 21,32 – 23,73	22,12 ± 0,27 21,58 – 22,48	21,18 ± 0,44 20,24 – 21,76	20,08 ± 0,23 19,76 – 20,57	19,35 ± 0,26 19,05 – 19,66
Comfortpaal h=0,6m	22,97 ± 0,76 21,20 – 23,62	22,01 ± 0,27 21,47 – 22,37	21,06 ± 0,45 20,13 – 21,64	19,96 ± 0,23 19,64 – 20,46	19,23 ± 0,26 18,93 – 19,54
Comfortpaal h=1,1m	22,94 ± 0,76 21,18 – 23,59	21,98 ± 0,27 21,44 – 22,34	21,04 ± 0,45 20,10 – 21,62	19,94 ± 0,24 19,61 – 20,43	19,20 ± 0,26 18,90 – 19,52
Comfortpaal h=1,7m	22,96 ± 0,76 21,19 – 23,61	21,99 ± 0,27 21,45 – 22,36	21,05 ± 0,45 20,10 – 21,63	19,94 ± 0,24 19,61 – 20,44	19,20 ± 0,26 18,90 – 19,52
Tafel	23,01 ± 0,76 21,24 – 23,66	22,05 ± 0,27 21,51 – 22,41	21,10 ± 0,45 20,16 – 21,68	20,00 ± 0,24 19,67 – 20,49	19,26 ± 0,26 18,96 – 19,58
Kast	23,27 ± 0,77 21,47 – 23,93	22,29 ± 0,27 21,74 – 22,66	21,33 ± 0,45 20,38 – 21,92	20,22 ± 0,24 19,89 – 20,72	19,47 ± 0,26 18,17 – 19,79

Tabel A.12: Gemiddelde resultaten meetsessie 2, luchttemperatuur (t=450 – t=480)

	mean ± stdev min-max	
	t=450	t=480
Comfortpaal h=0,1m	18,84 ± 0,41 18,33 – 19,34	18,60 ± 0,53 17,94 – 19,27
Comfortpaal h=0,6m	18,72 ± 0,41 18,21 – 19,23	18,48 ± 0,53 17,82 – 19,15
Comfortpaal h=1,1m	18,69 ± 0,41 18,18 – 19,20	18,45 ± 0,53 17,79 – 19,12
Comfortpaal h=1,7m	18,69 ± 0,41 18,18 – 19,20	18,45 ± 0,53 17,78 – 19,12
Tafel	18,75 ± 0,41 18,24 – 19,26	18,51 ± 0,53 17,84 – 19,18
Kast	18,96 ± 0,41 18,44 – 19,47	18,72 ± 0,54 18,04 – 19,39

Appendix 9. Gemeten fysiologische parameters

9.2 Meet sessie 1

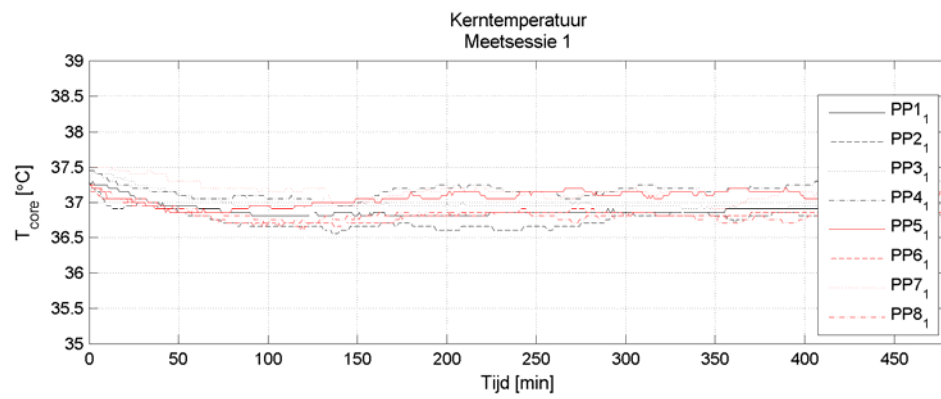
Tabel A.13: Gemiddelde resultaten meet sessie 1, gemiddelde huidtemperatuur en kerntemperatuur

	mean $\pm$ stdev min-max	
	Gemiddelde huidtemperatuur [°C]	Kerntemperatuur [°C]
PP1 ₁	35,15 $\pm$ 0,27 34,70 –35,82	36,88 $\pm$ 0,09 36,80 –37,30
PP2 ₁	34,53 $\pm$ 0,18 34,20 –35,11	36,76 $\pm$ 0,12 36,55 –37,20
PP3 ₁	34,71 $\pm$ 0,20 34,26 –35,16	36,99 $\pm$ 0,11 36,90 –37,45
PP4 ₁	33,93 $\pm$ 0,31 33,28 –34,63	37,18 $\pm$ 0,10 36,95 –37,45
PP5 ₁	34,74 $\pm$ 0,27 34,30 –35,33	37,07 $\pm$ 0,10 36,85 –37,25
PP6 ₁	34,41 $\pm$ 0,30 34,00 –35,06	36,83 $\pm$ 0,09 36,60 –37,20
PP7 ₁	34,55 $\pm$ 0,29 34,18 –35,38	37,16 $\pm$ 0,12 36,90 –37,50
PP8 ₁	34,97 $\pm$ 0,20 34,59 –35,33	36,82 $\pm$ 0,09 36,70 –37,25
mean	34,62 $\pm$ 0,19 34,39 –35,10	36,96 $\pm$ 0,08 36,83 –37,32

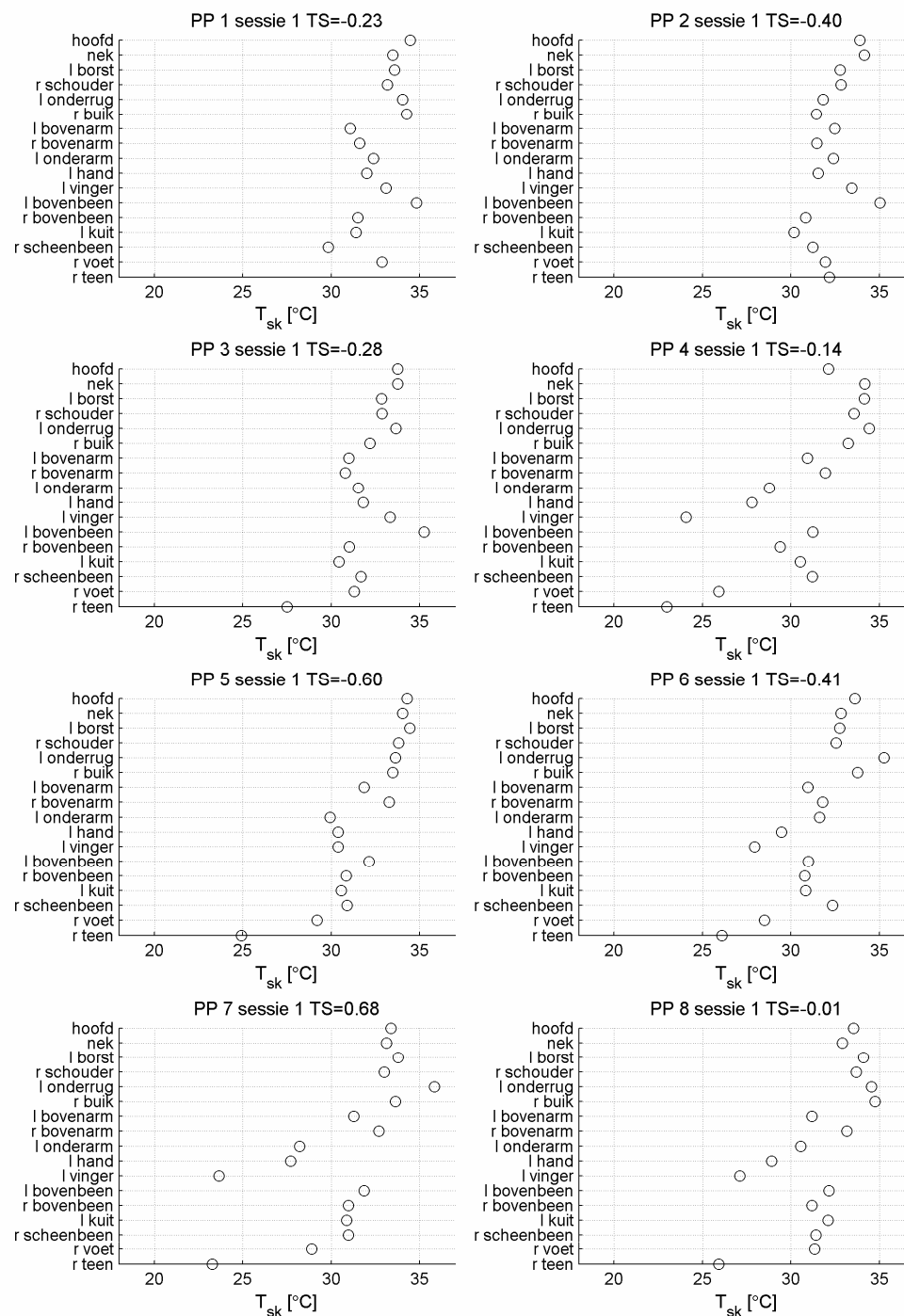
Tabel A.14: Gemiddelde resultaten meet sessie 1, vasomotie

	mean $\pm$ stdev min-max	
	ΔT (onderarm – vingertop) [°C]	ΔT (scheenbeen – teentop) [°C]
PP1 ₁	-0,70 $\pm$ 1,20 -2,47 –5,25	-
PP2 ₁	-1,03 $\pm$ 0,61 -2,35 –1,58	-0,93 $\pm$ 1,06 -3,31 –1,08
PP3 ₁	-1,81 $\pm$ 1,19 -3,99 –3,23	4,20 $\pm$ 2,38 -1,93 –6,90
PP4 ₁	4,69 $\pm$ 3,31 -2,84 –8,30	8,24 $\pm$ 2,04 1,08 –10,21
PP5 ₁	-0,45 $\pm$ 1,49 -3,22 –3,99	5,96 $\pm$ 3,23 -3,44 –8,94
PP6 ₁	3,67 $\pm$ 3,32 -2,10 –8,67	6,26 $\pm$ 4,09 -2,43 –10,33
PP7 ₁	4,55 $\pm$ 2,59 -2,96 –8,04	7,67 $\pm$ 0,40 6,91 –8,68
PP8 ₁	3,44 $\pm$ 3,16 -3,72 –9,93	5,48 $\pm$ 2,71 -2,06 –7,79
mean	1,55 $\pm$ 1,34 -1,56 –4,16	5,27 $\pm$ 2,20 -0,45 –7,25

* Bij proefpersoon 1 is de temperatuur van de teentop niet gemeten



Figuur A.16: Verloop kerntemperatuur meetsessie



Figuur A.17: Temperatuurverdeling over het lichaam meetsessie 1

9.2 Meet sessie 2

Tabel A.15: Gemiddelde resultaten meet sessie 2, gemiddelde huidtemperatuur, kerntemperatuur en vasomotie
(t=0 – t=120)

	mean ± stdev min - max				
	t=0	t=30	t=60	t=90	t=120
Gemiddelde huidtemperatuur [°C]	33,57 ± 0,48 33,14 – 34,35	33,41 ± 0,68 31,78 – 34,13	33,31 ± 0,68 31,78 – 34,13	33,34 ± 0,66 31,99 – 34,22	33,48 ± 0,66 32,11 – 34,30
Kerntemperatuur [°C]	37,24 ± 0,24 36,90 – 37,65	37,02 ± 0,28 36,70 – 37,55	36,91 ± 0,29 36,55 – 37,50	36,86 ± 0,29 36,55 – 37,50	36,83 ± 0,29 36,55 – 37,50
ΔT (onderarm – vingertop) [°C]	-0,73 ± 1,87 -3,22 – 2,10	1,68 ± 3,51 -2,46 – 6,79	4,64 ± 3,31 0,18 – 8,54	4,18 ± 3,32 -0,19 – 9,18	4,55 ± 3,36 -0,95 – 9,55
ΔT (scheenbeen – teentop) [°C]	3,95 ± 4,90 -1,56 – 9,57	4,76 ± 4,16 -2,07 – 9,45	6,26 ± 2,24 2,60 – 9,08	7,22 ± 1,48 5,26 – 9,09	7,70 ± 1,05 6,40 – 8,96

Tabel A.16: Gemiddelde resultaten meet sessie 2, gemiddelde huidtemperatuur, kerntemperatuur en vasomotie
(t=150 – t=270)

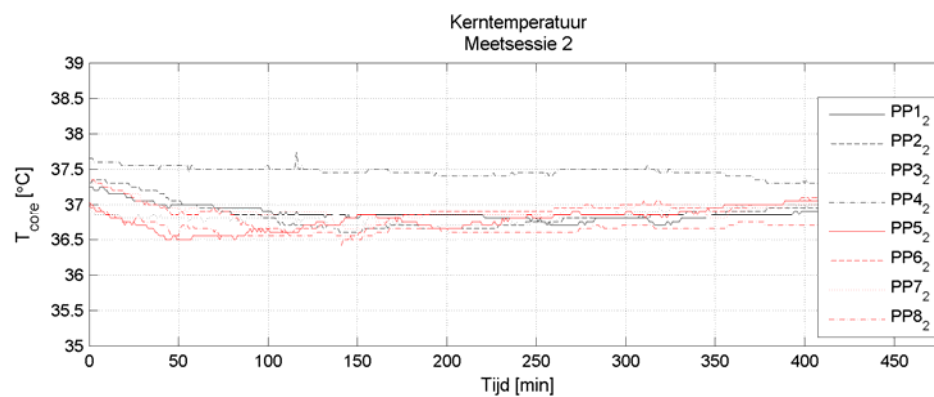
	mean ± stdev min - max				
	t=150	t=180	t=210	t=240	t=270
Gemiddelde huidtemperatuur [°C]	33,95 ± 0,27 33,60 – 34,53	34,44 ± 0,30 33,96 – 35,00	34,74 ± 0,36 34,09 – 35,28	35,05 ± 0,38 34,38 – 35,57	35,18 ± 0,41 34,46 – 35,76
Kerntemperatuur [°C]	36,67 ± 0,30 36,50 – 37,45	36,84 ± 0,26 36,65 – 37,45	36,83 ± 0,25 36,60 – 37,40	36,85 ± 0,26 36,60 – 37,45	36,90 ± 0,27 36,60 – 37,50
ΔT (onderarm – vingertop) [°C]	4,12 ± 3,84 -1,83 – 8,17	2,23 ± 3,80 -2,46 – 7,66	0,874 ± 2,78 -2,83 – 4,37	-0,22 ± 1,37 -1,97 – 1,72	0,41 ± 2,04 -2,22 – 3,37
ΔT (scheenbeen – teentop) [°C]	8,12 ± 1,53 5,76 – 9,71	7,22 ± 3,08 0,717 – 9,58	6,78 ± 3,33 -0,43 – 9,58	6,47 ± 2,81 1,59 – 9,19	5,05 ± 4,14 -1,43 – 8,69

Tabel A.17: Gemiddelde resultaten meet sessie 2, gemiddelde huidtemperatuur, kerntemperatuur en vasomotie
(t=300 – t=420)

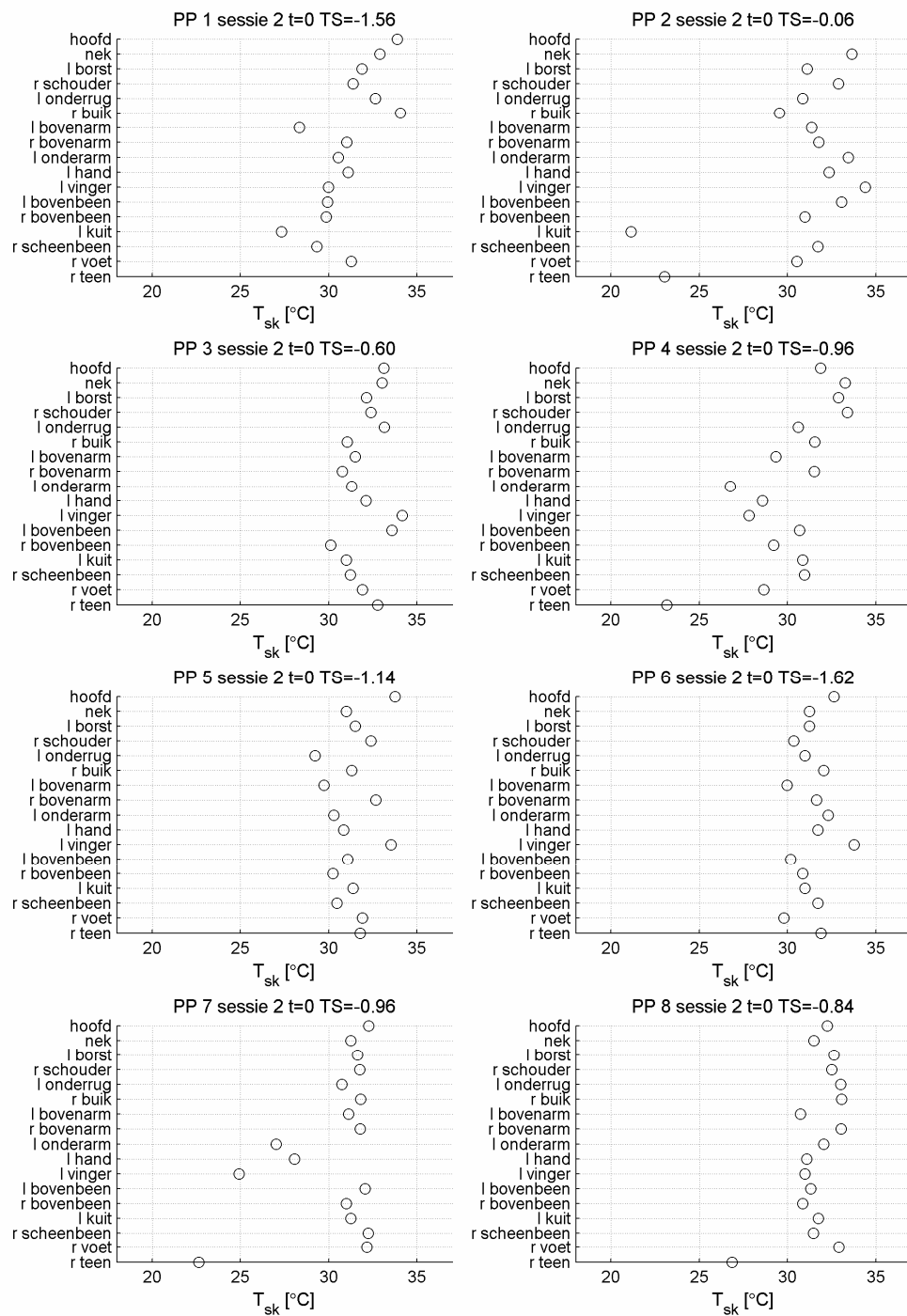
	mean ± stdev min - max				
	t=300	t=330	t=360	t=390	t=420
Gemiddelde huidtemperatuur [°C]	35,21 ± 0,58 34,11 – 35,75	35,00 ± 0,49 34,21 – 35,55	34,80 ± 0,53 34,03 – 35,53	34,60 ± 0,49 33,89 – 35,37	34,22 ± 0,44 33,61 – 34,87
Kerntemperatuur [°C]	36,94 ± 0,25 36,70 – 37,50	36,94 ± 0,24 36,65 – 37,45	36,96 ± 0,20 36,70 – 37,40	36,98 ± 0,17 36,70 – 37,30	37,01 ± 0,17 36,70 – 37,30
ΔT (onderarm – vingertop) [°C]	0,52 ± 3,84 -1,83 – 8,17	0,35 ± 2,40 -2,22 – 4,12	3,10 ± 3,82 -2,60 – 7,90	2,69 ± 3,93 -2,34 – 8,67	4,40 ± 4,14 -1,96 – 9,93
ΔT (scheenbeen – teentop) [°C]	4,25 ± 4,33 -1,81 – 8,17	4,56 ± 3,81 -1,06 – 8,06	5,26 ± 3,55 0,20 – 8,43	5,00 ± 3,77 -0,05 – 8,56	6,30 ± 2,92 2,98 – 9,33

Tabel A.18: Gemiddelde resultaten meetsessie 2, gemiddelde huidtemperatuur, kerntemperatuur en vasomotie
($t=450 - t=480$)

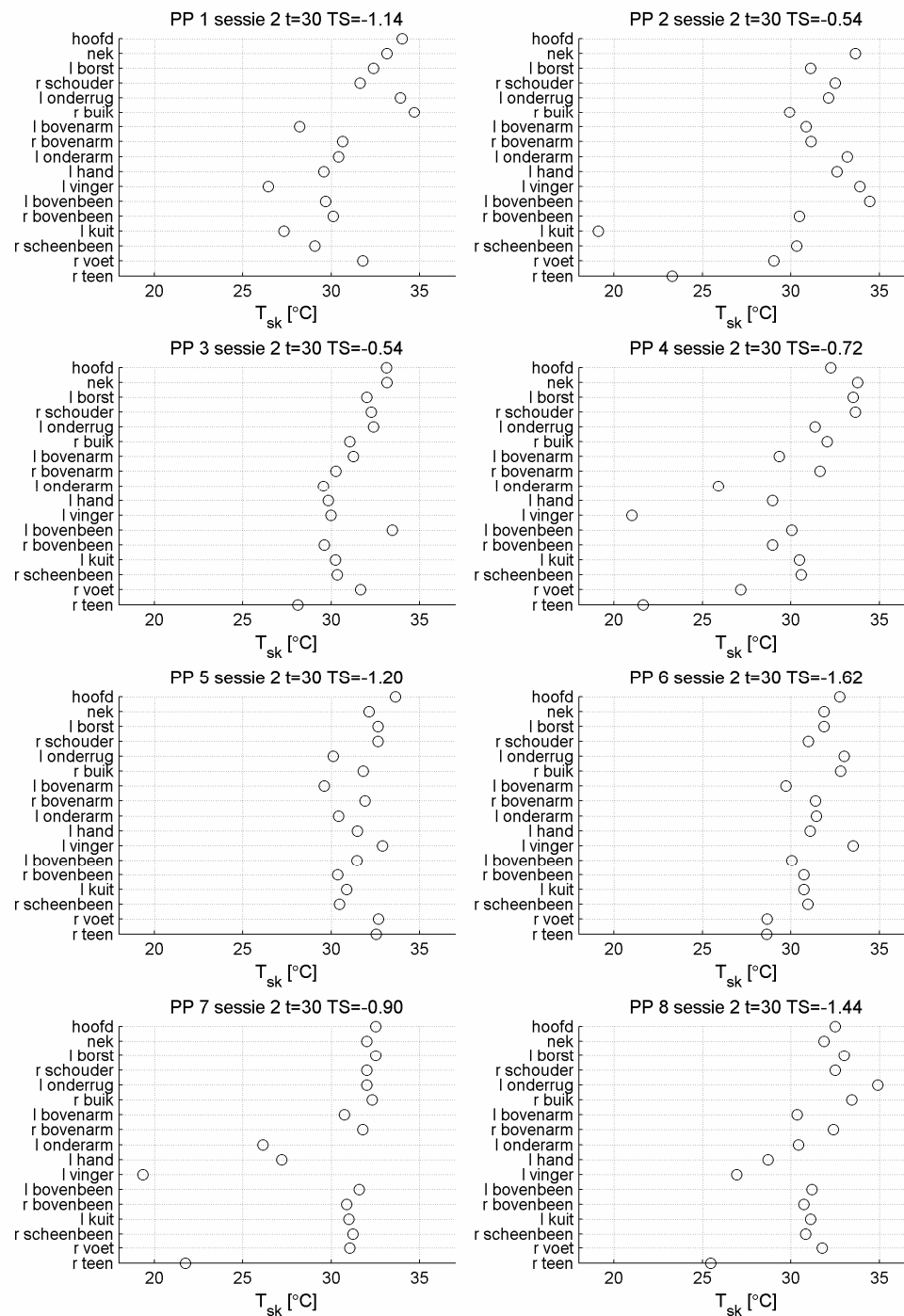
	mean $\pm$ stdev min - max	
	t=450	t=480
Gemiddelde huidtemperatuur [°C]	33,831 $\pm$ 0,41 33,39 – 34,49	33,62 $\pm$ 0,36 33,14 – 34,20
Kerntemperatuur [°C]	37,02 $\pm$ 0,19 36,65 – 37,30	36,98 $\pm$ 0,20 36,60 – 37,30
ΔT (onderarm – vingertop) [°C]	3,61 $\pm$ 3,34 -1,58 – 7,03	5,98 $\pm$ 3,15 -0,95 – 9,05
ΔT (scheenbeen – teentop) [°C]	7,14 $\pm$ 2,75 3,24 – 10,48	7,85 $\pm$ 2,37 5,01 – 11,50



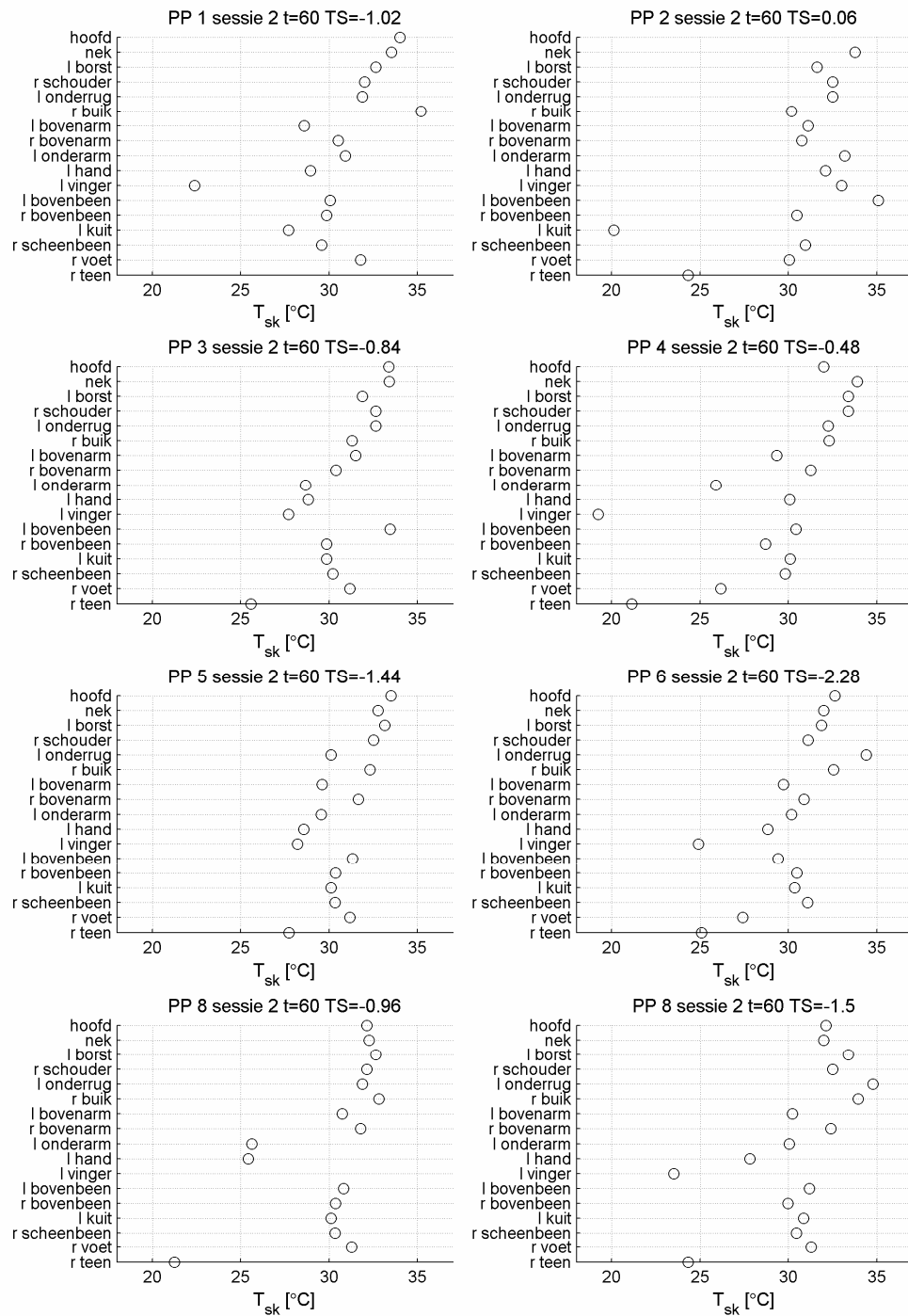
Figuur A.18: Verloop kerntemperatuur meetsessie



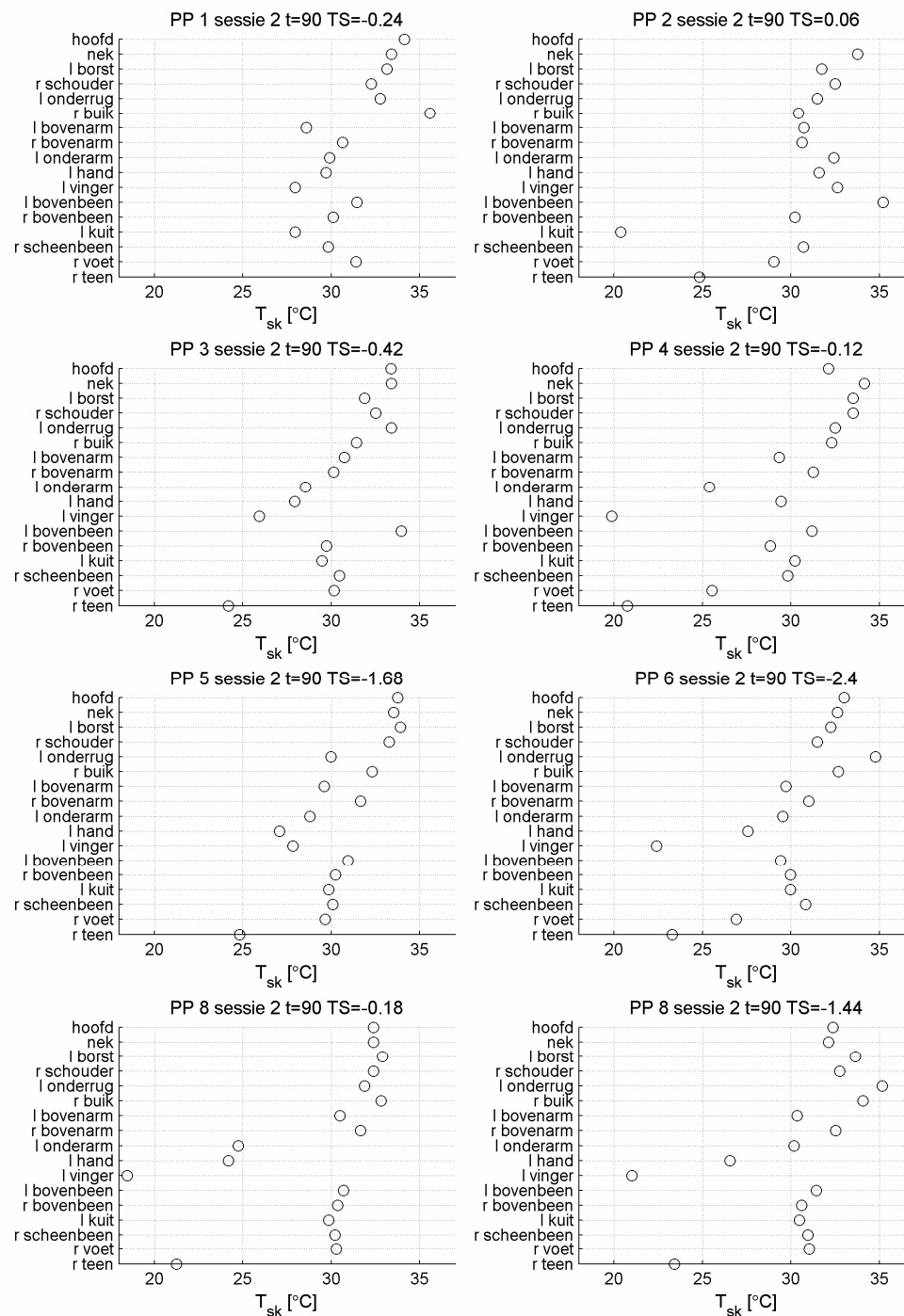
Figuur A.19: Temperatuurverdeling over het lichaam meet sessie 2 $t=0$



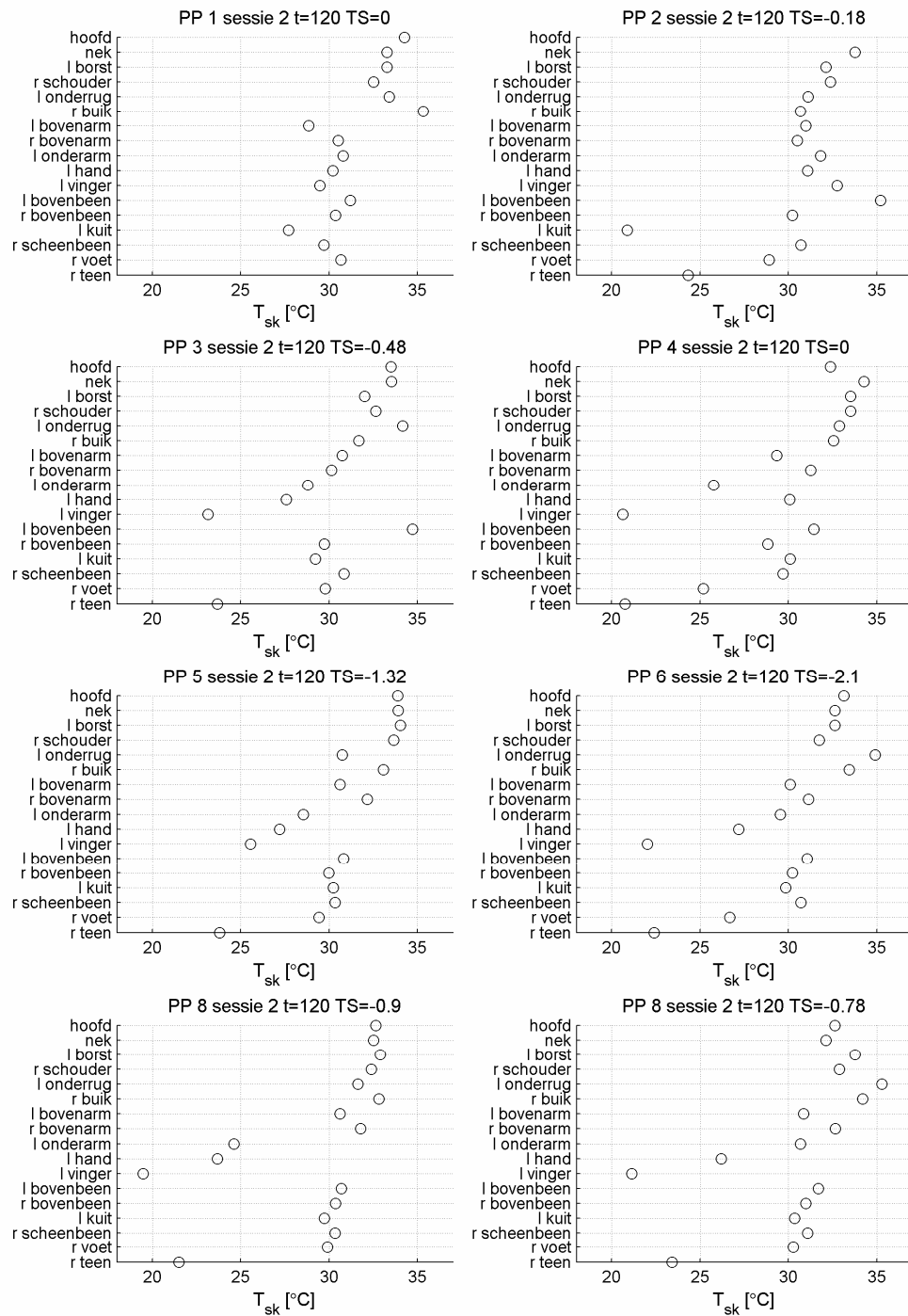
Figuur A.20: Temperatuurverdeling over het lichaam meetsessie 2 $t=30$



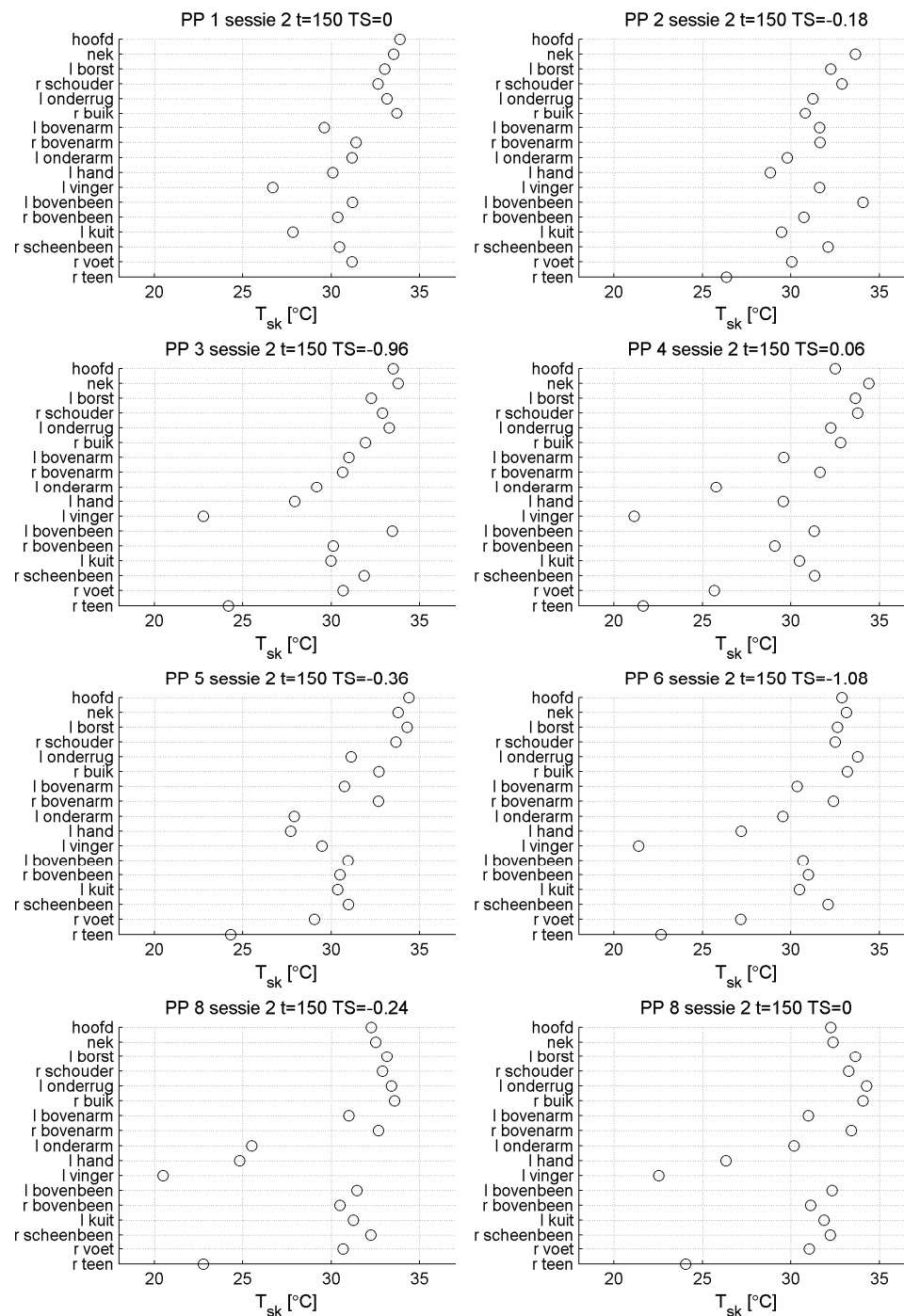
Figuur A.21: Temperatuurverdeling over het lichaam meet sessie 2 $t=60$



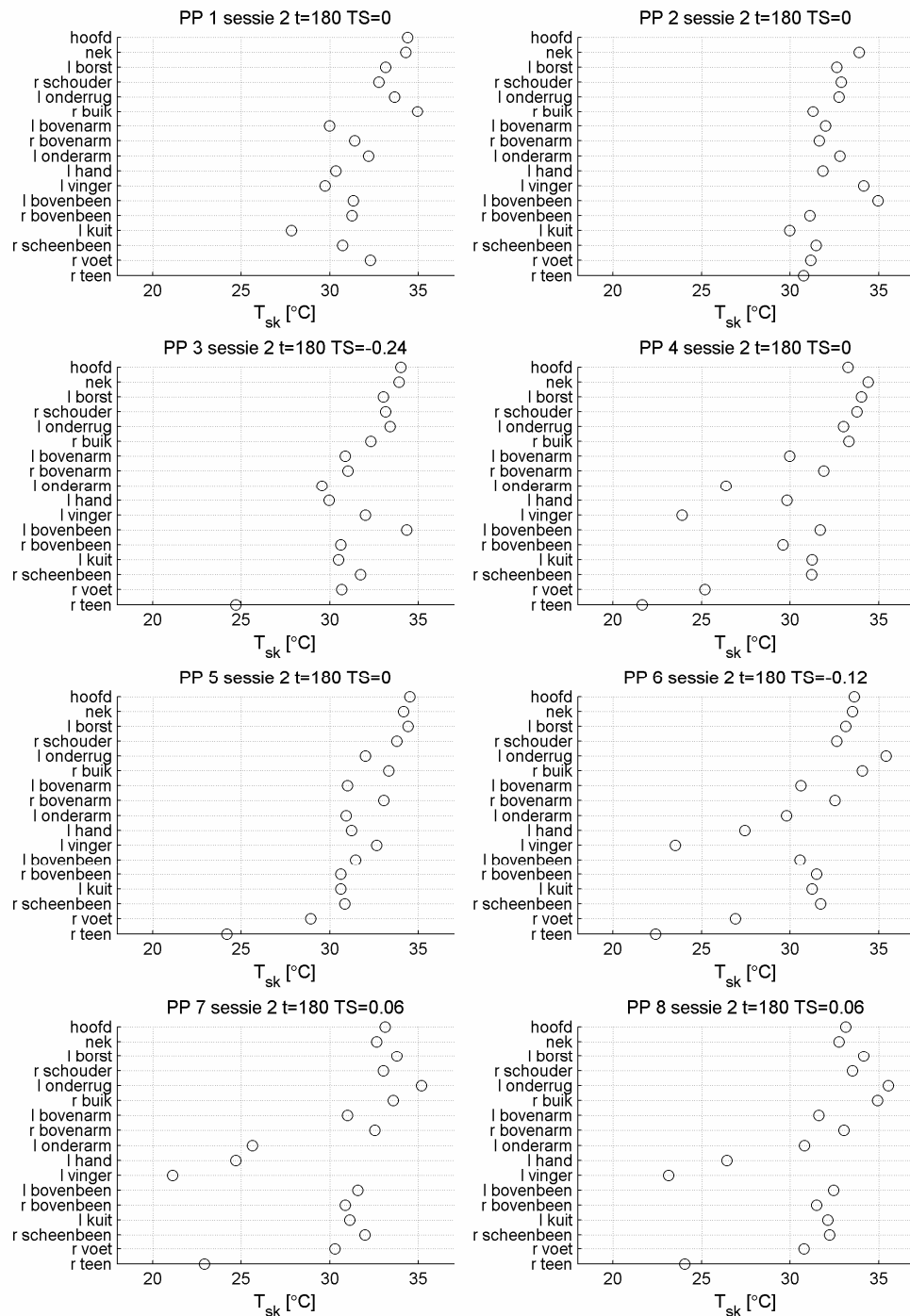
Figuur A.22: Temperatuurverdeling over het lichaam meet sessie 2 t=90



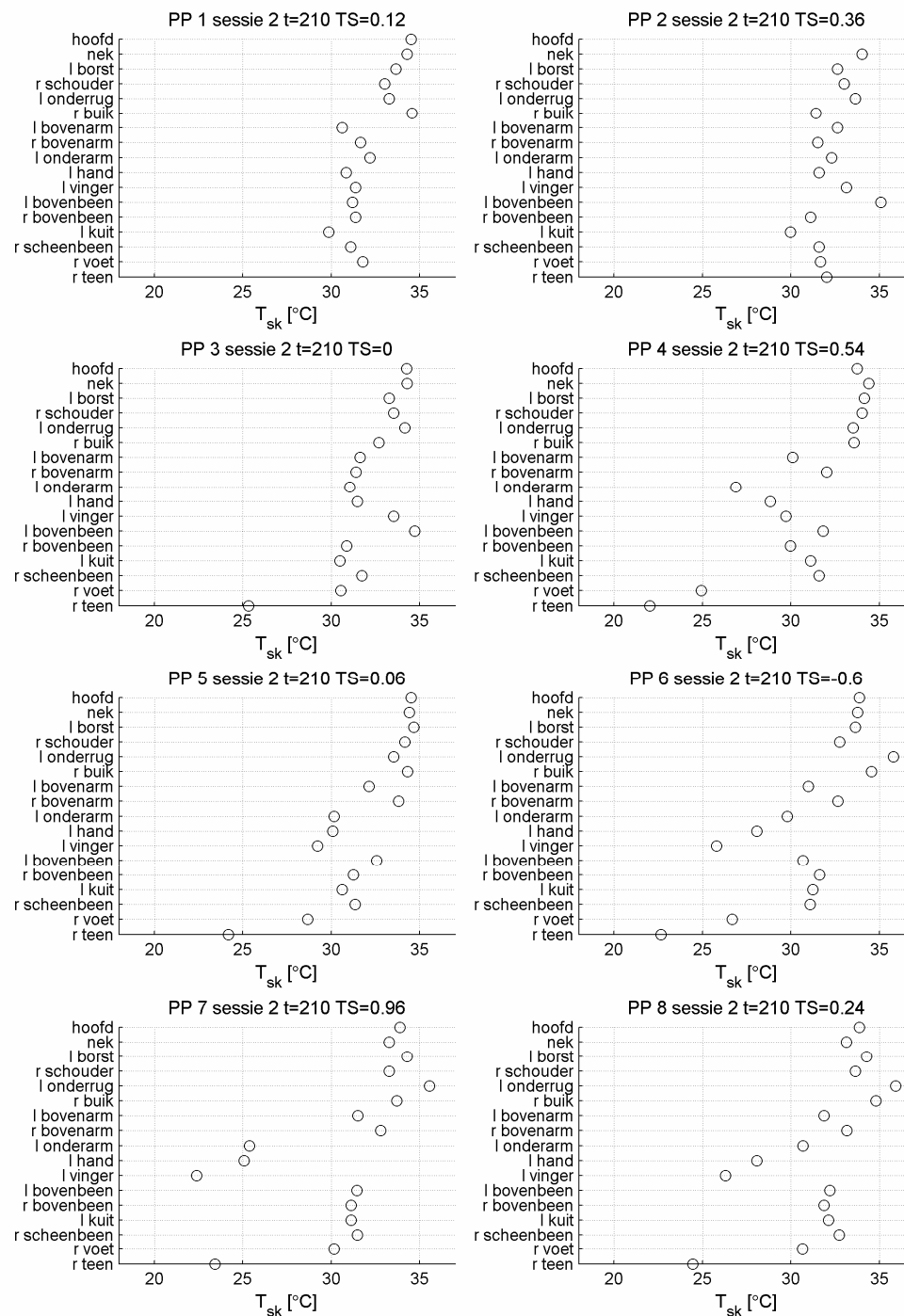
Figuur A.23: Temperatuurverdeling over het lichaam meet sessie 2 $t=120$



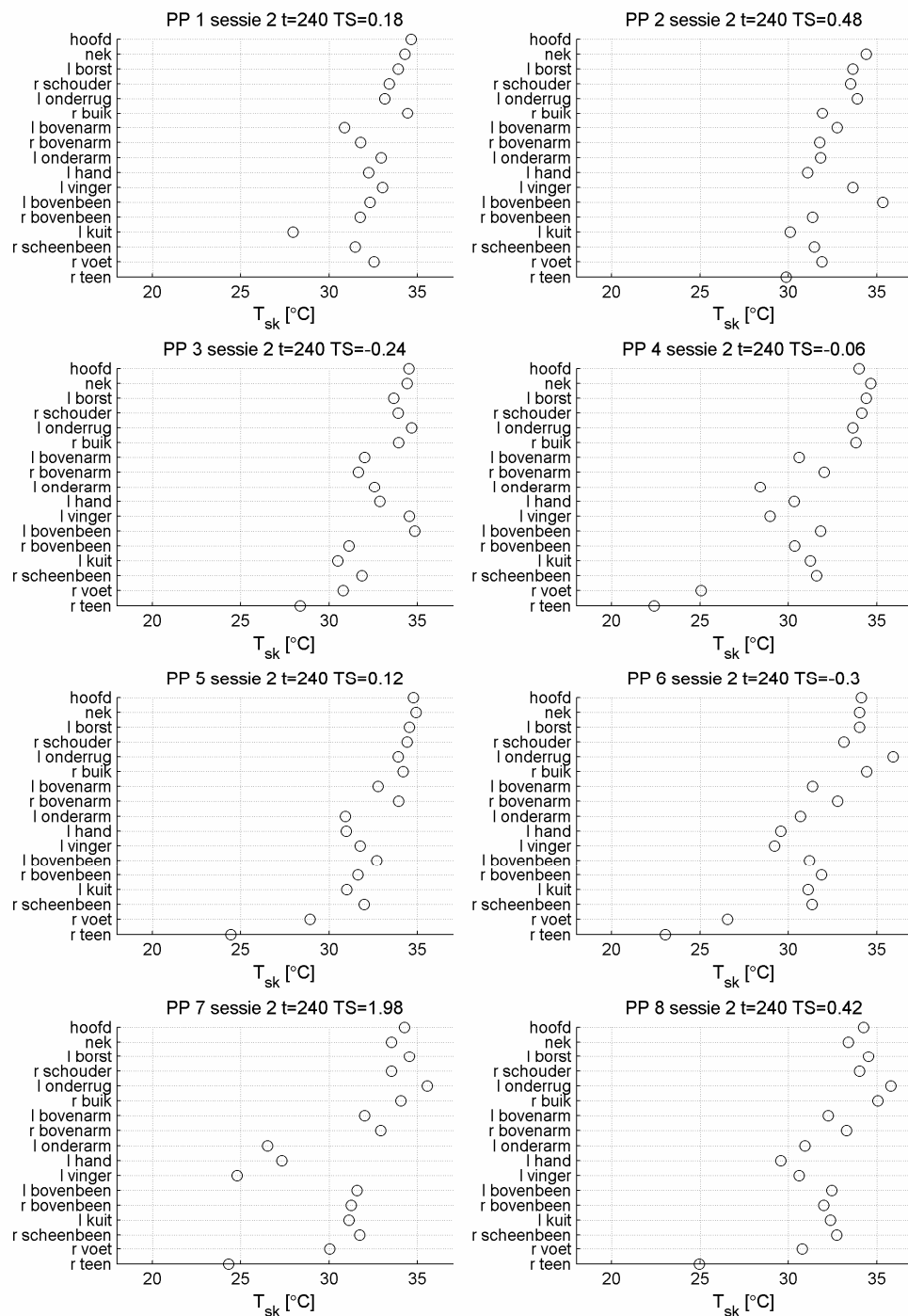
Figuur A.24: Temperatuurverdeling over het lichaam meet sessie 2 t=150



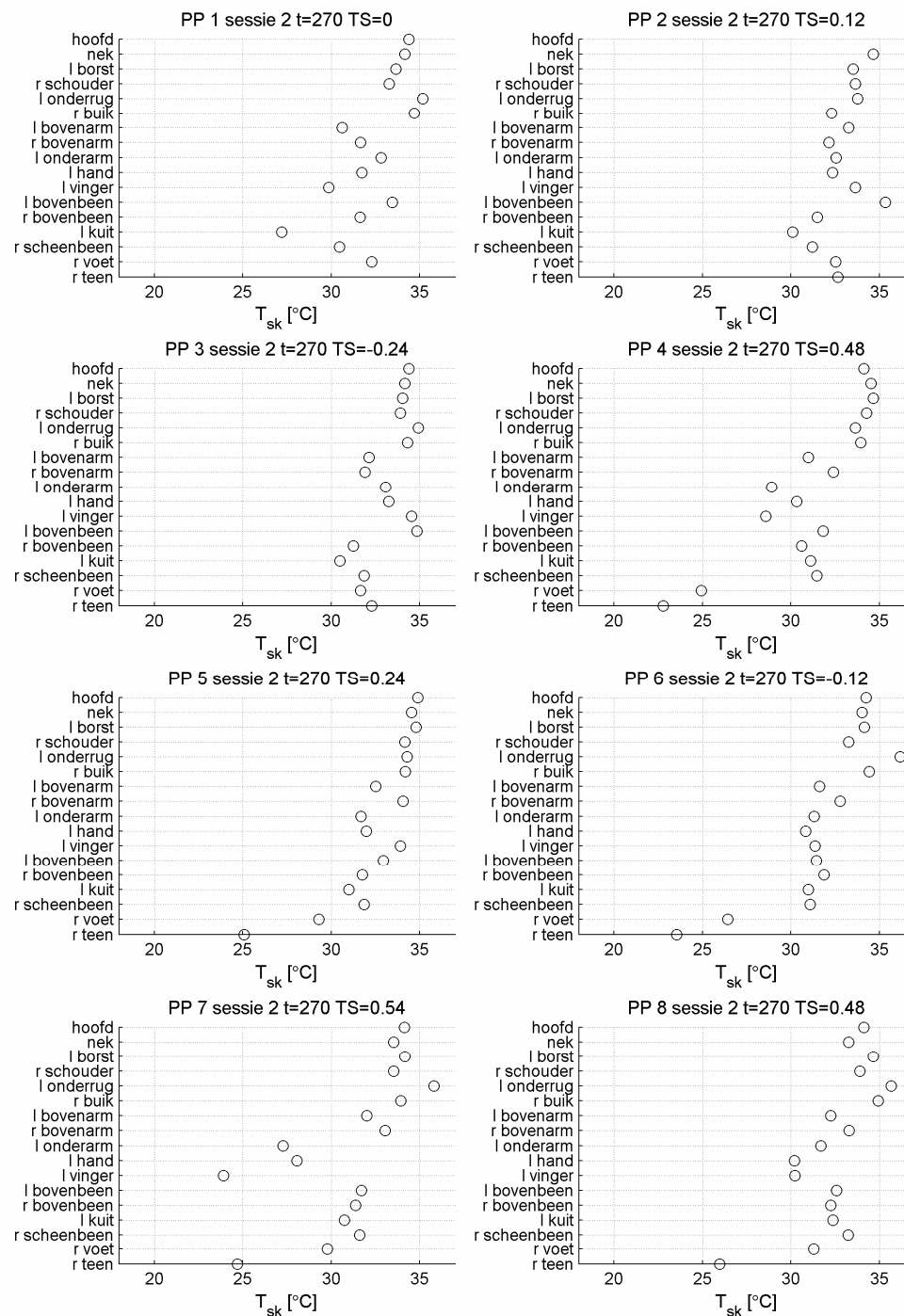
Figuur A.25: Temperatuurverdeling over het lichaam meet sessie 2 $t=180$



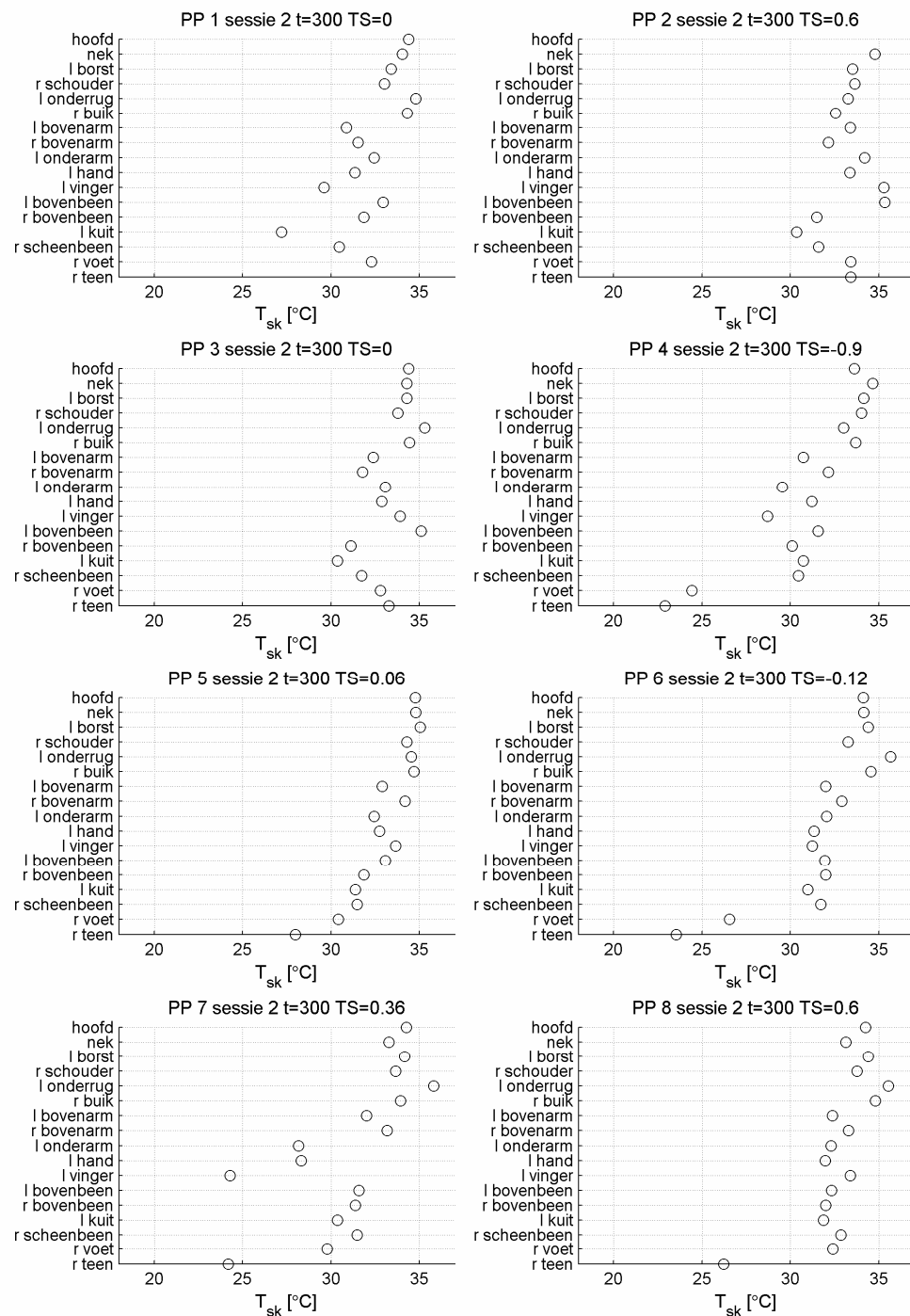
Figuur A.26: Temperatuurverdeling over het lichaam meet sessie 2 $t=210$



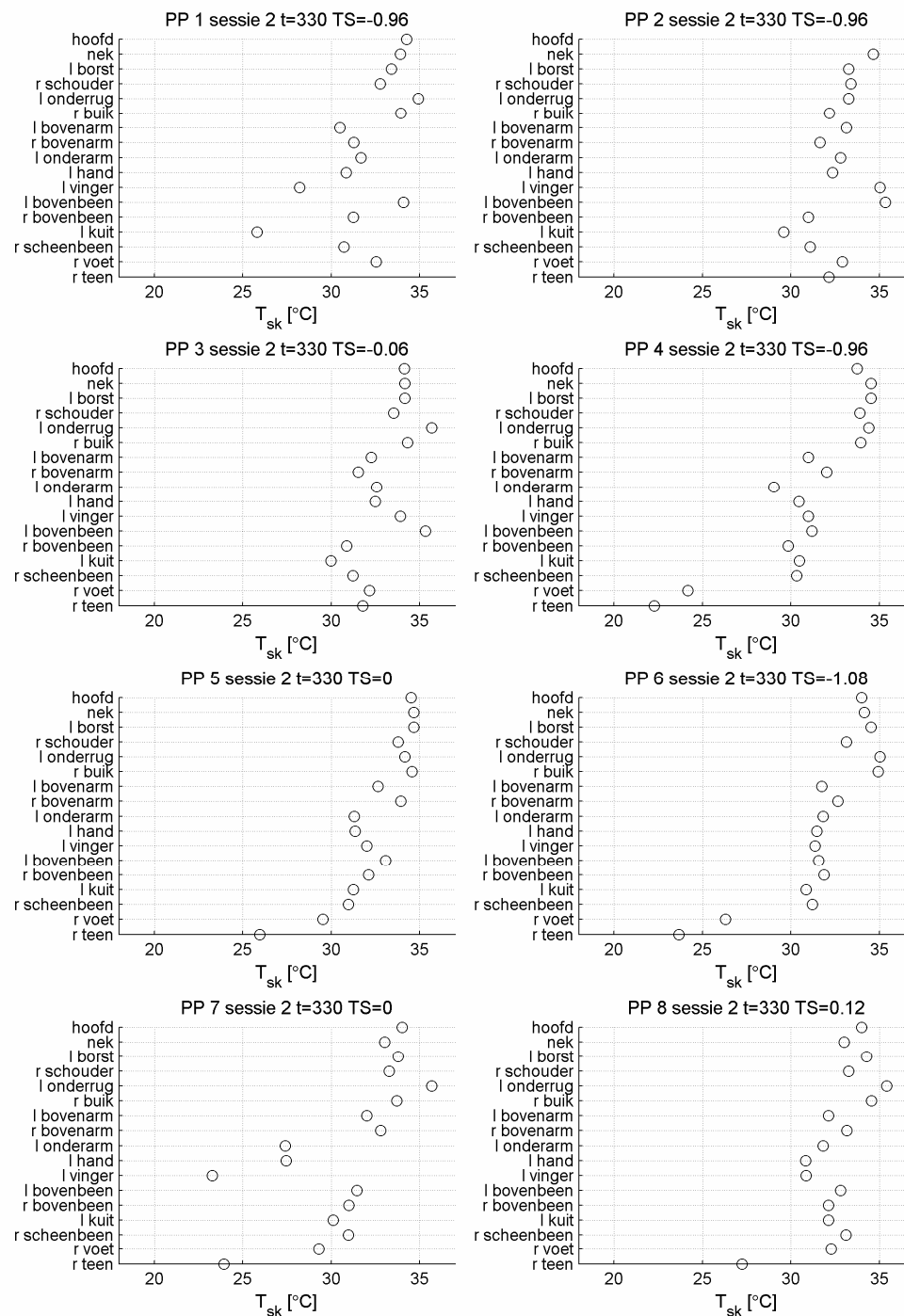
Figuur A.27: Temperatuurverdeling over het lichaam meet sessie 2 $t=240$



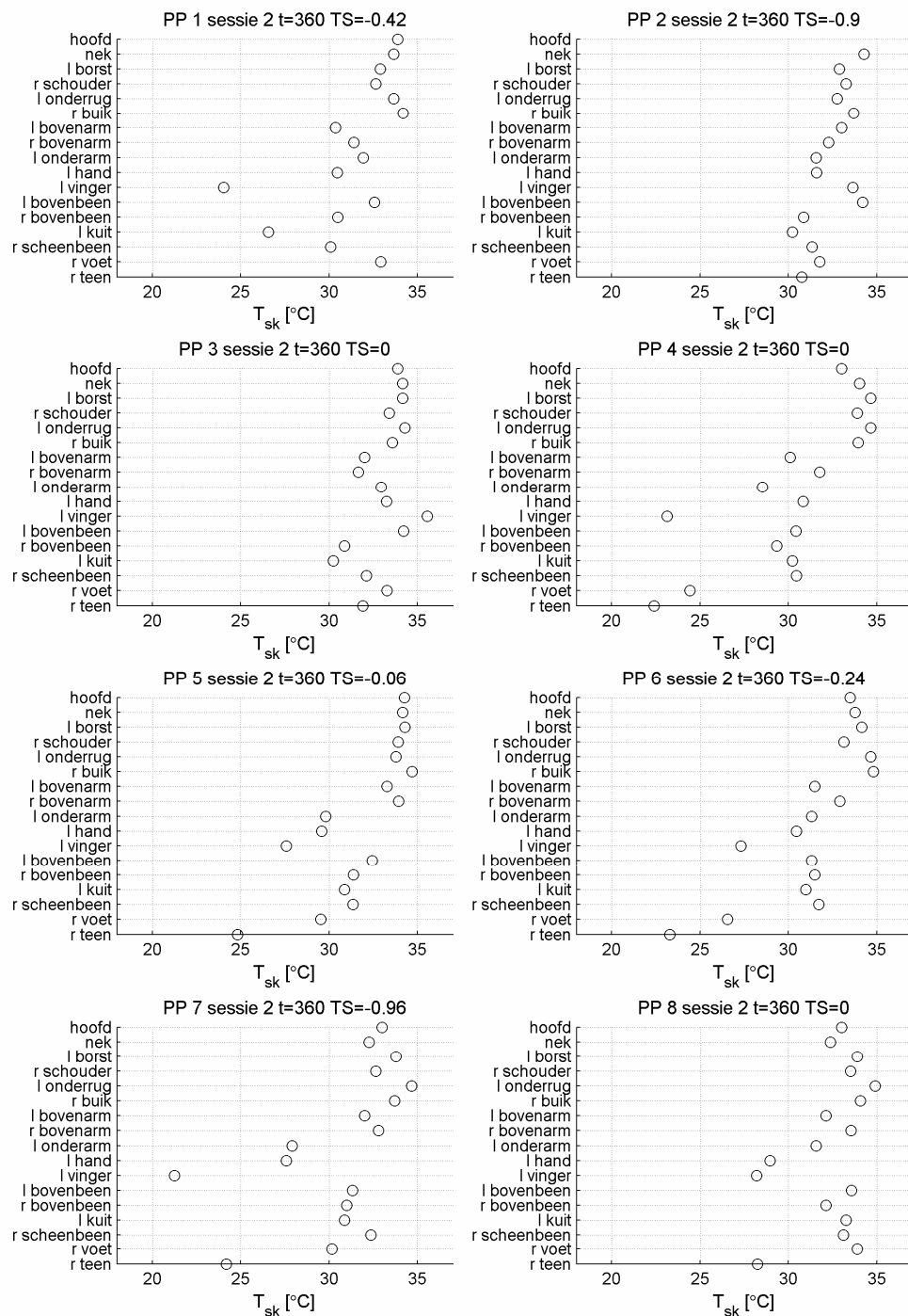
Figuur A.28: Temperatuurverdeling over het lichaam meet sessie 2 $t=270$



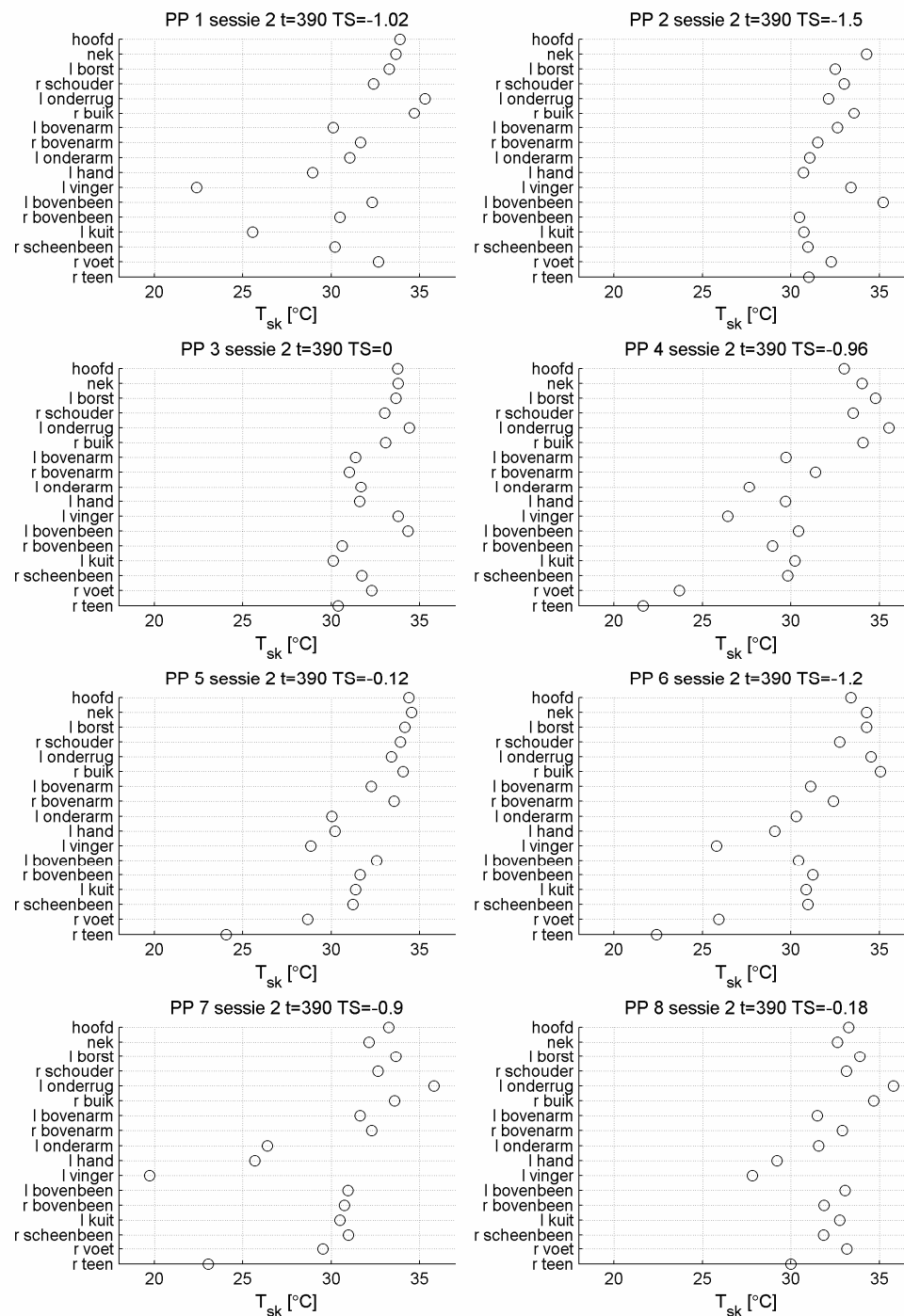
Figuur A.29: Temperatuurverdeling over het lichaam meet sessie 2 $t=300$



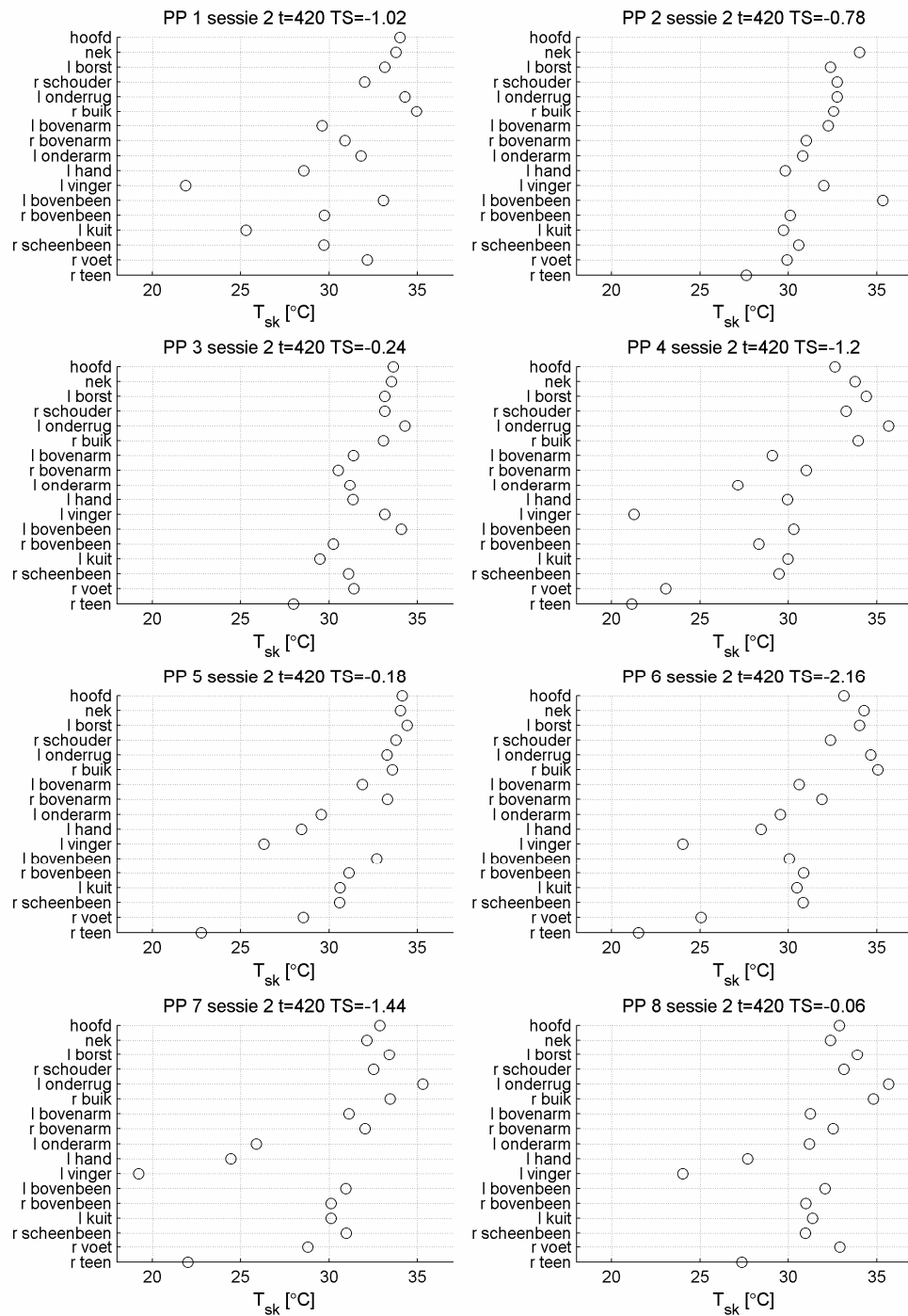
Figuur A.30: Temperatuurverdeling over het lichaam meet sessie 2 $t=330$



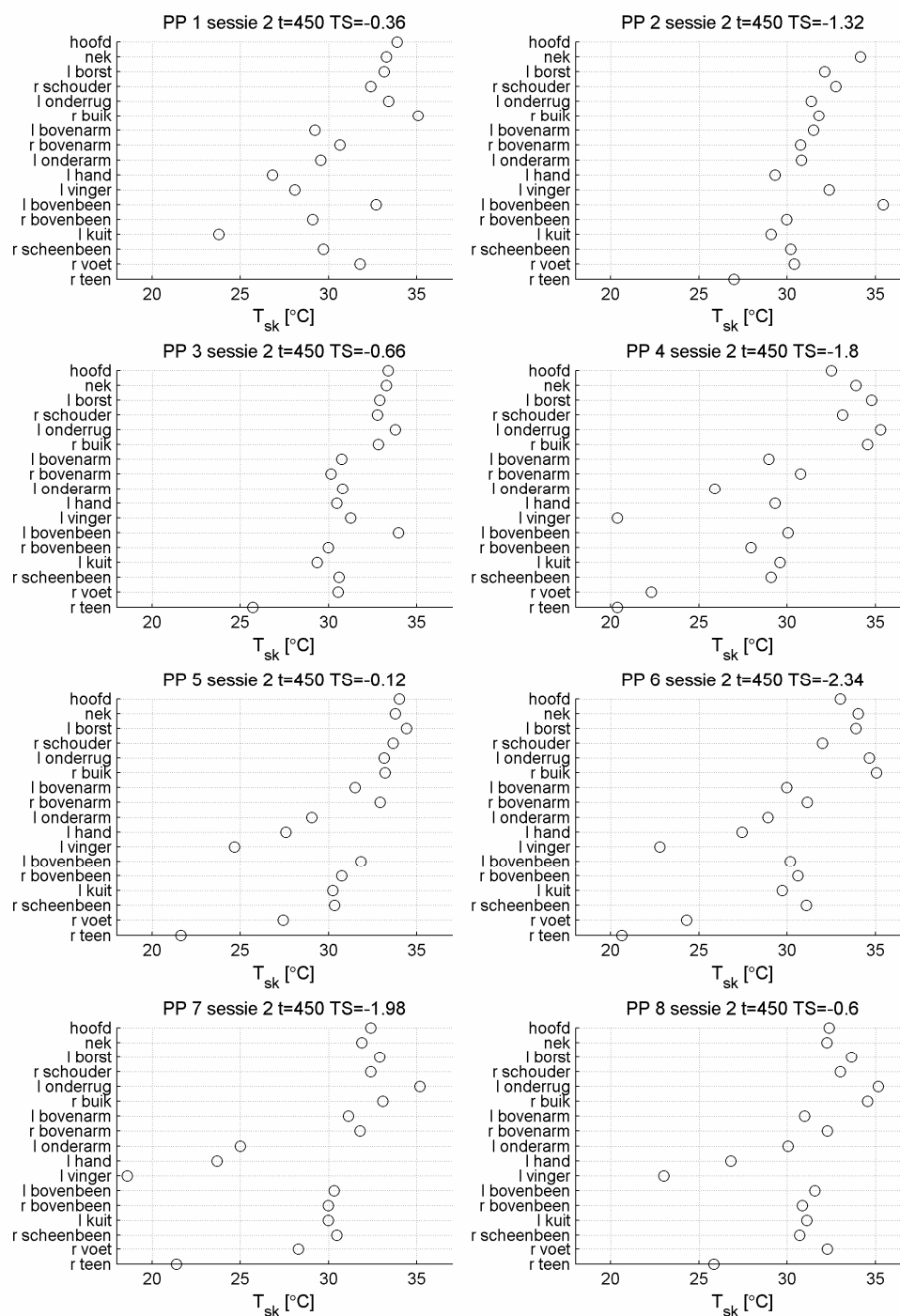
Figuur A.31: Temperatuurverdeling over het lichaam meet sessie 2 $t=360$



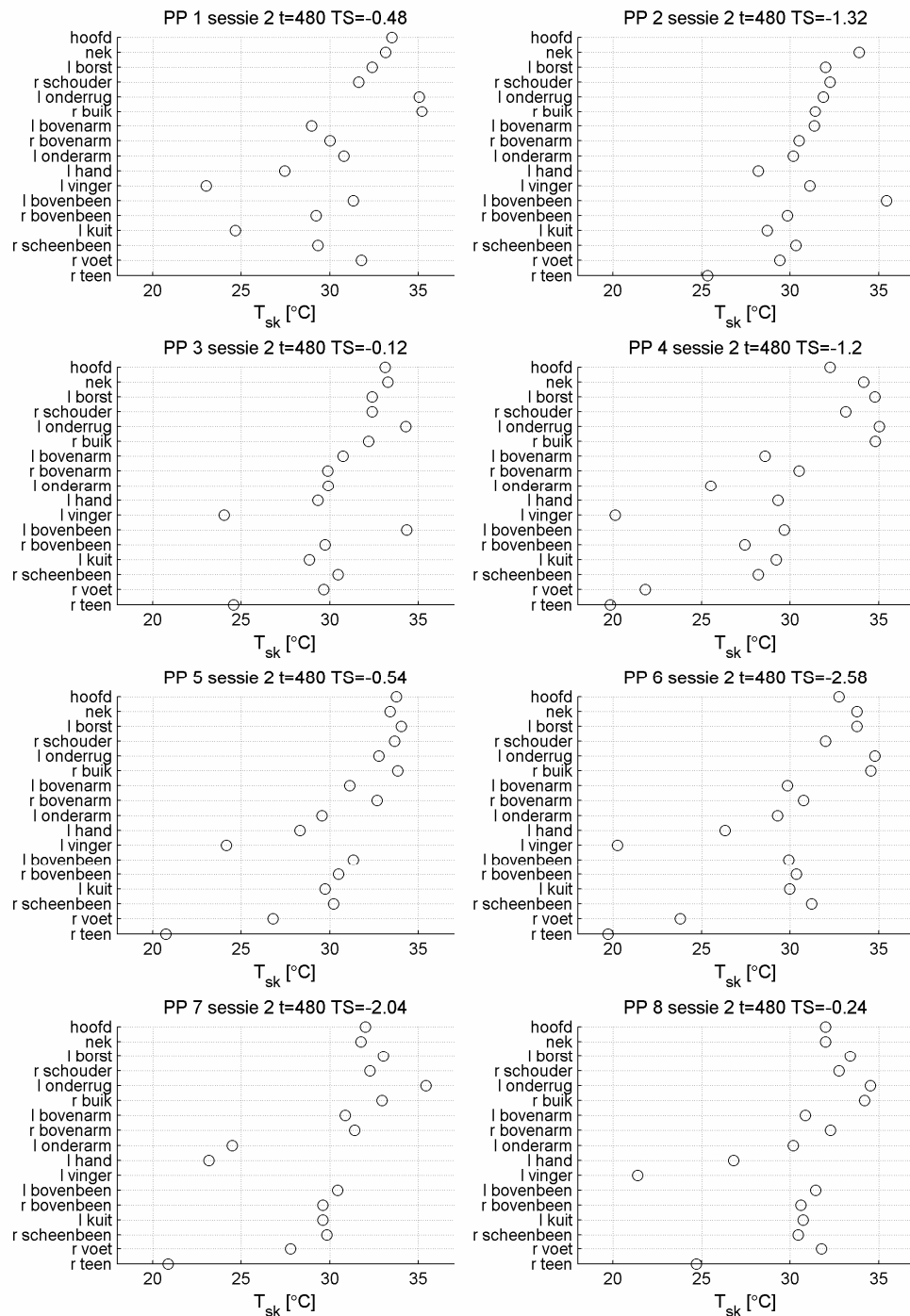
Figuur A.32: Temperatuurverdeling over het lichaam meet sessie 2 $t=390$



Figuur A.33: Temperatuurverdeling over het lichaam meet sessie 2 $t=420$



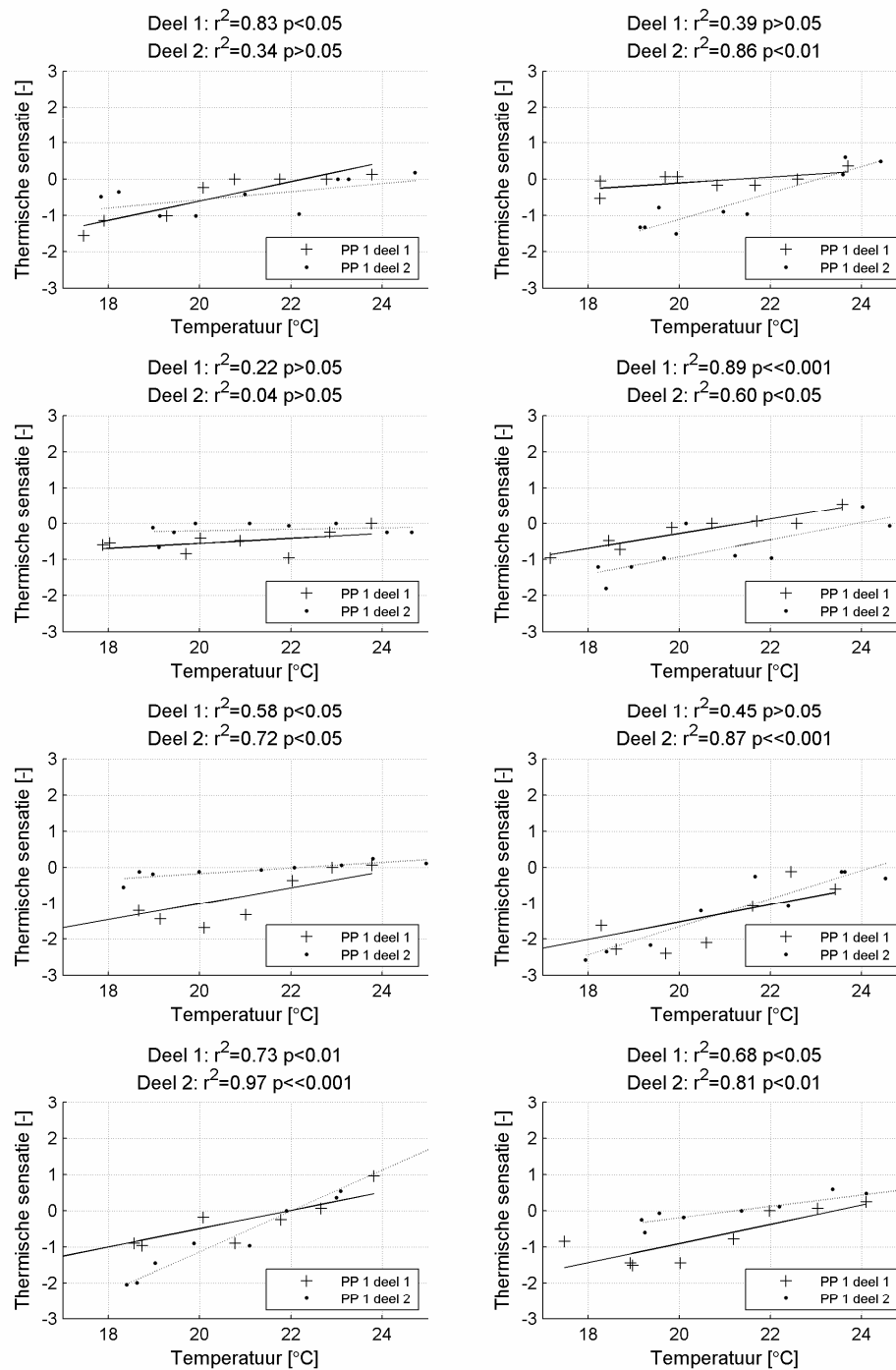
Figuur A.34: Temperatuurverdeling over het lichaam meet sessie 2 $t=450$



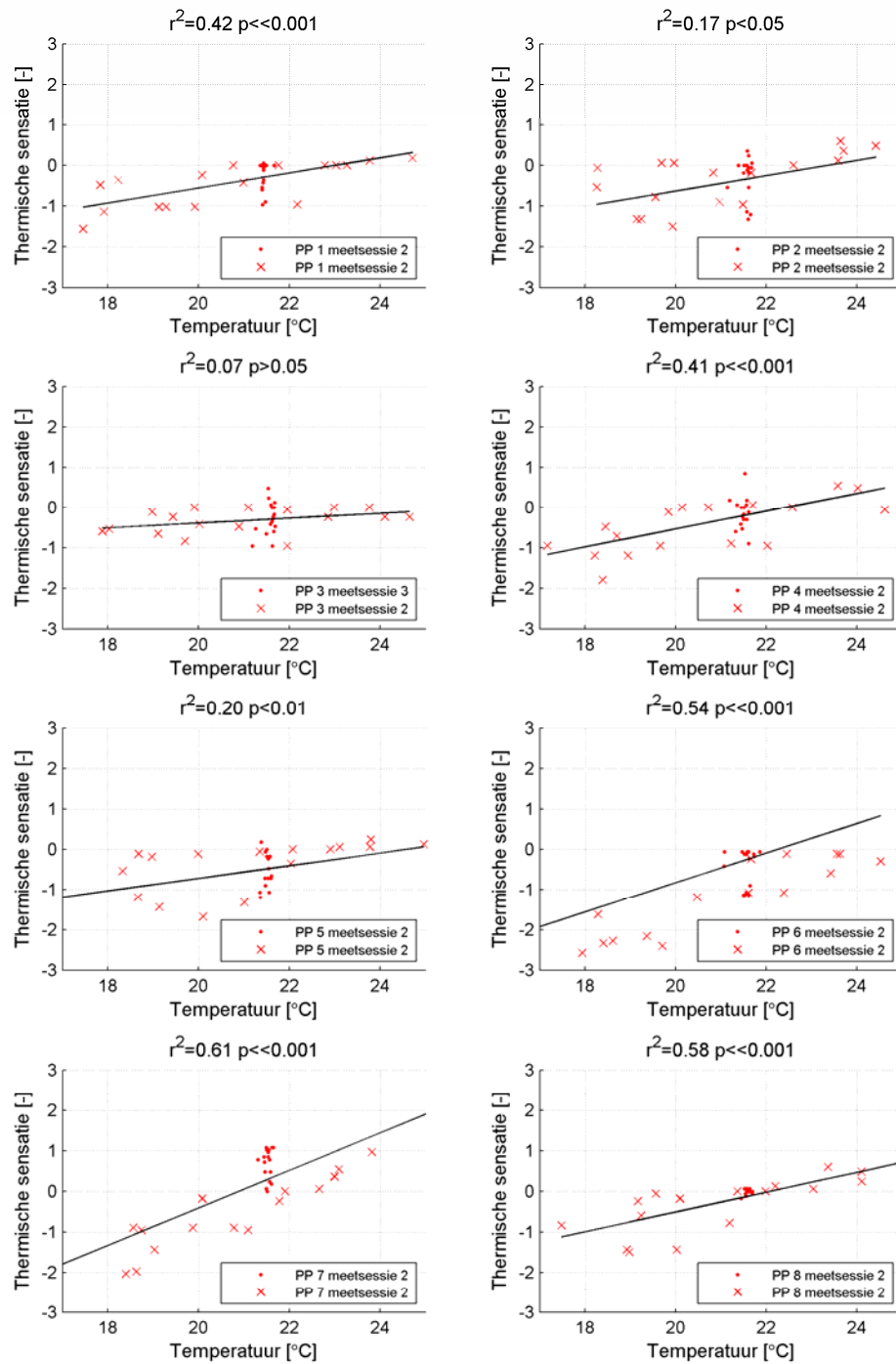
Figuur A.35: Temperatuurverdeling over het lichaam meet sessie 2 $t=480$

Appendix 10. Resultaten comfortvragenlijsten

10.1 Thermische sensatie vs luchttemperatuur

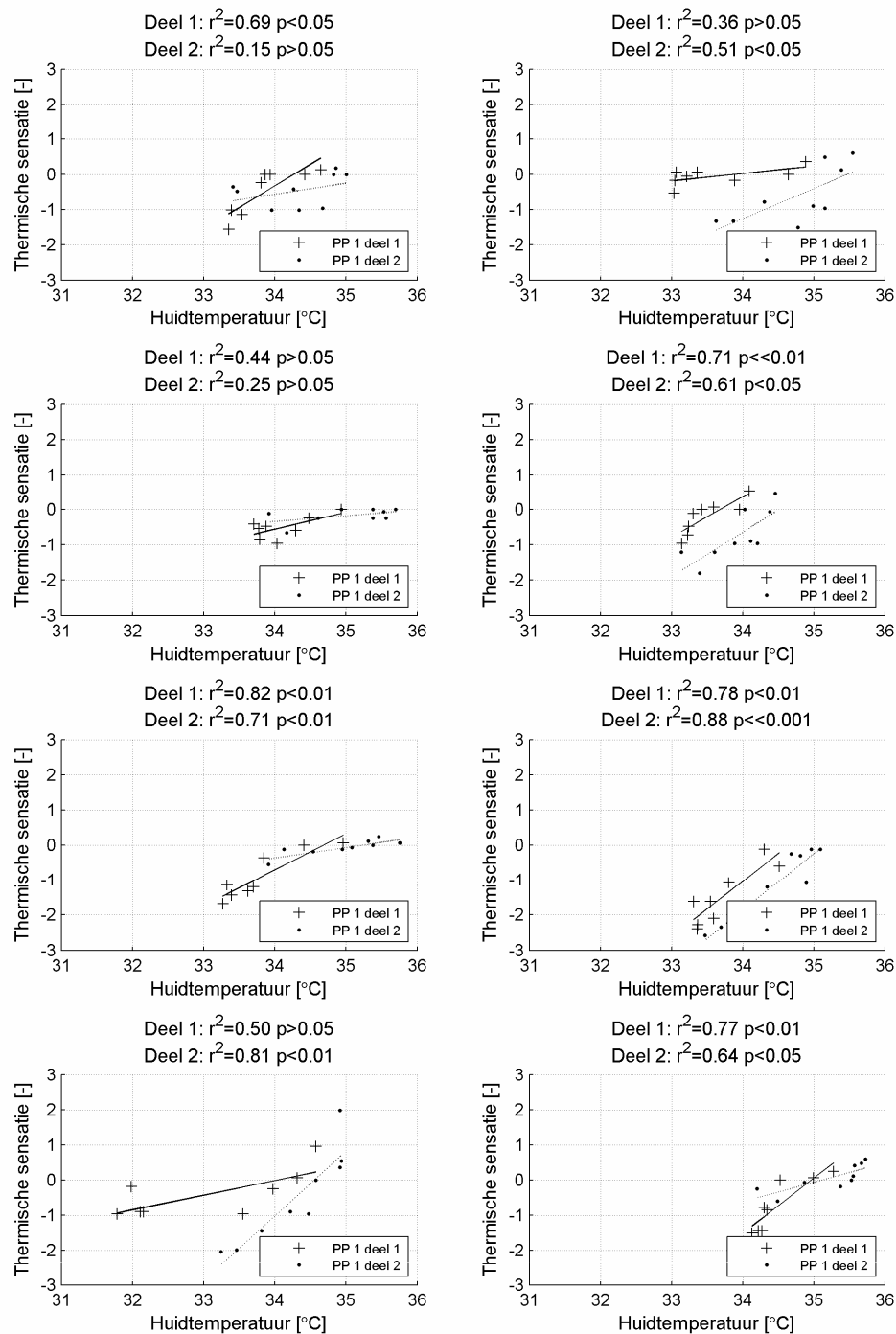


Figuur A.36: Thermische sensatie versus luchttemperatuur meetsessie 2 (deel 1=t/m 240 min, deel 2= 240-480 min)

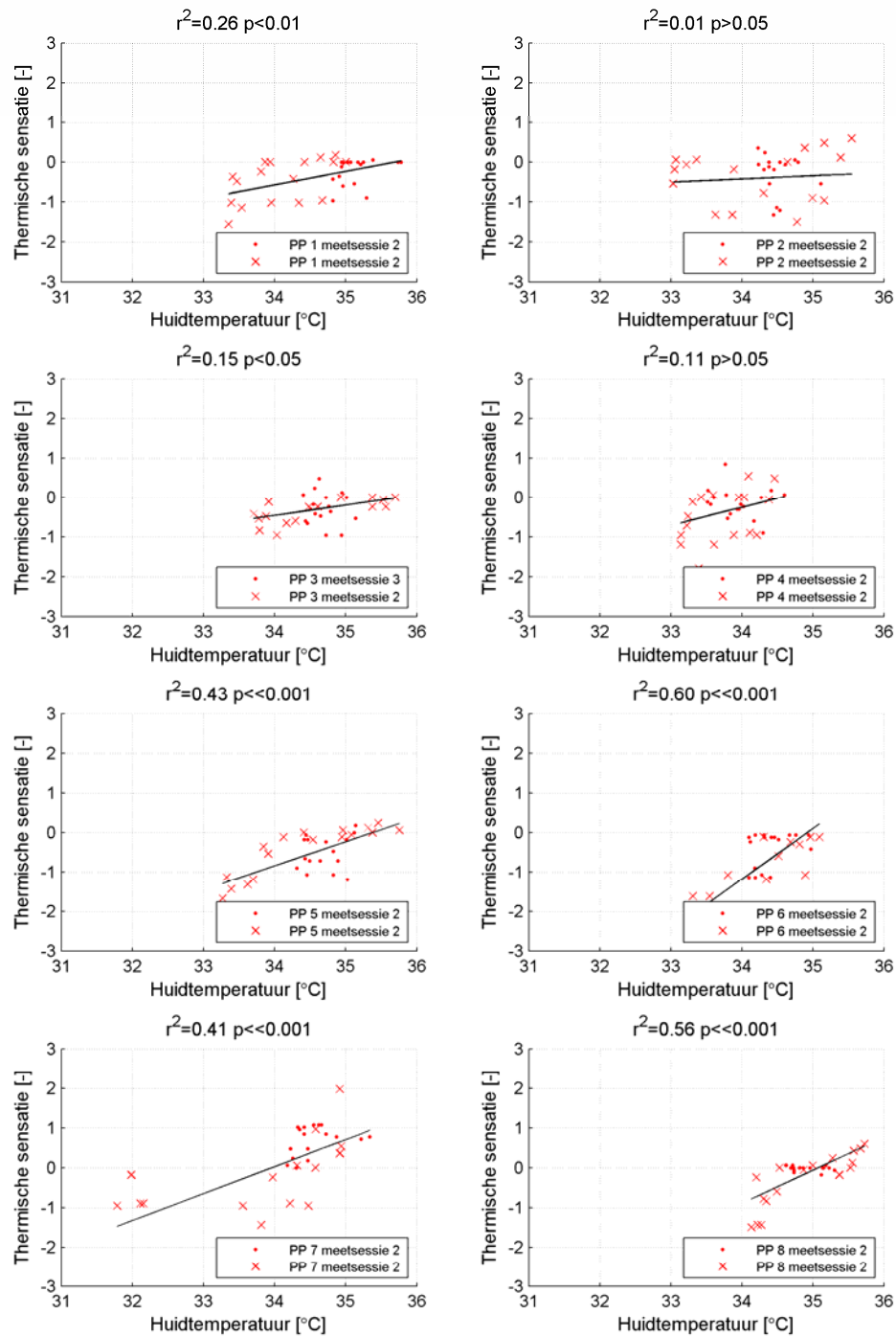


Figuur A.37: Thermische sensatie versus luchttemperatuur meetsessie 1 en 2

10.2 Thermische sensatie vs huidtemperatuur

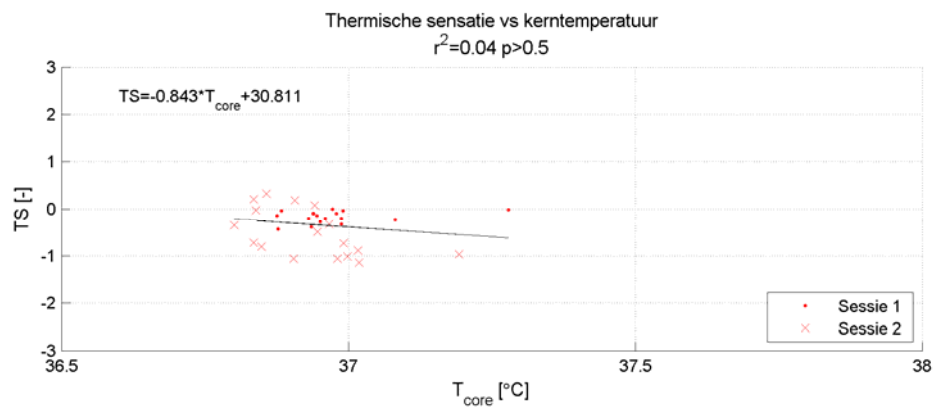


Figuur A.38: Thermische sensatie versus huidtemperatuur meet sessie 2 (deel 1=t/m 240 min, deel 2= 240-480 min)

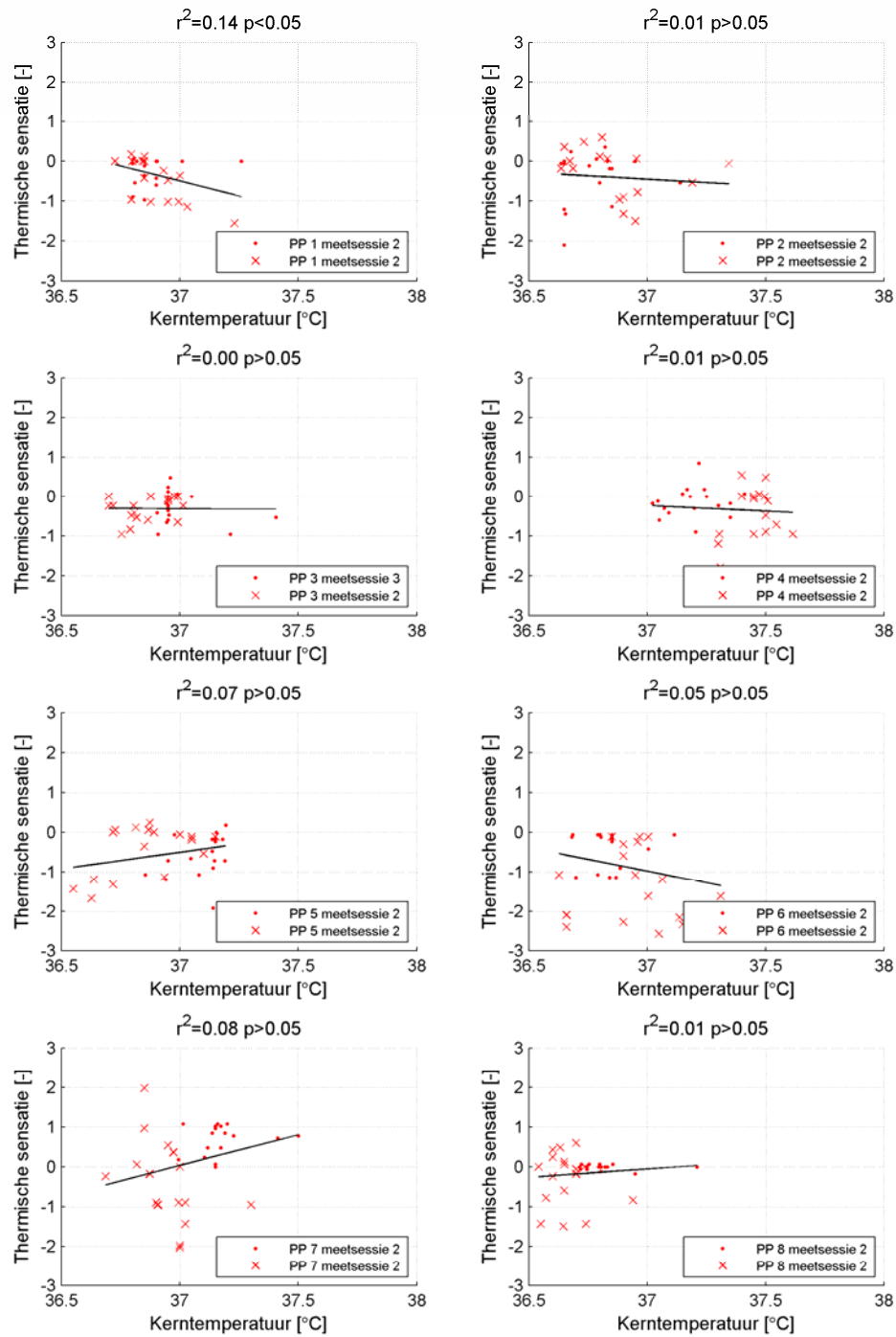


Figuur A.39 Thermische sensatie versus huidtemperatuur meetsessie 1 en 2

10.3 Thermische sensatie vs kerntemperatuur

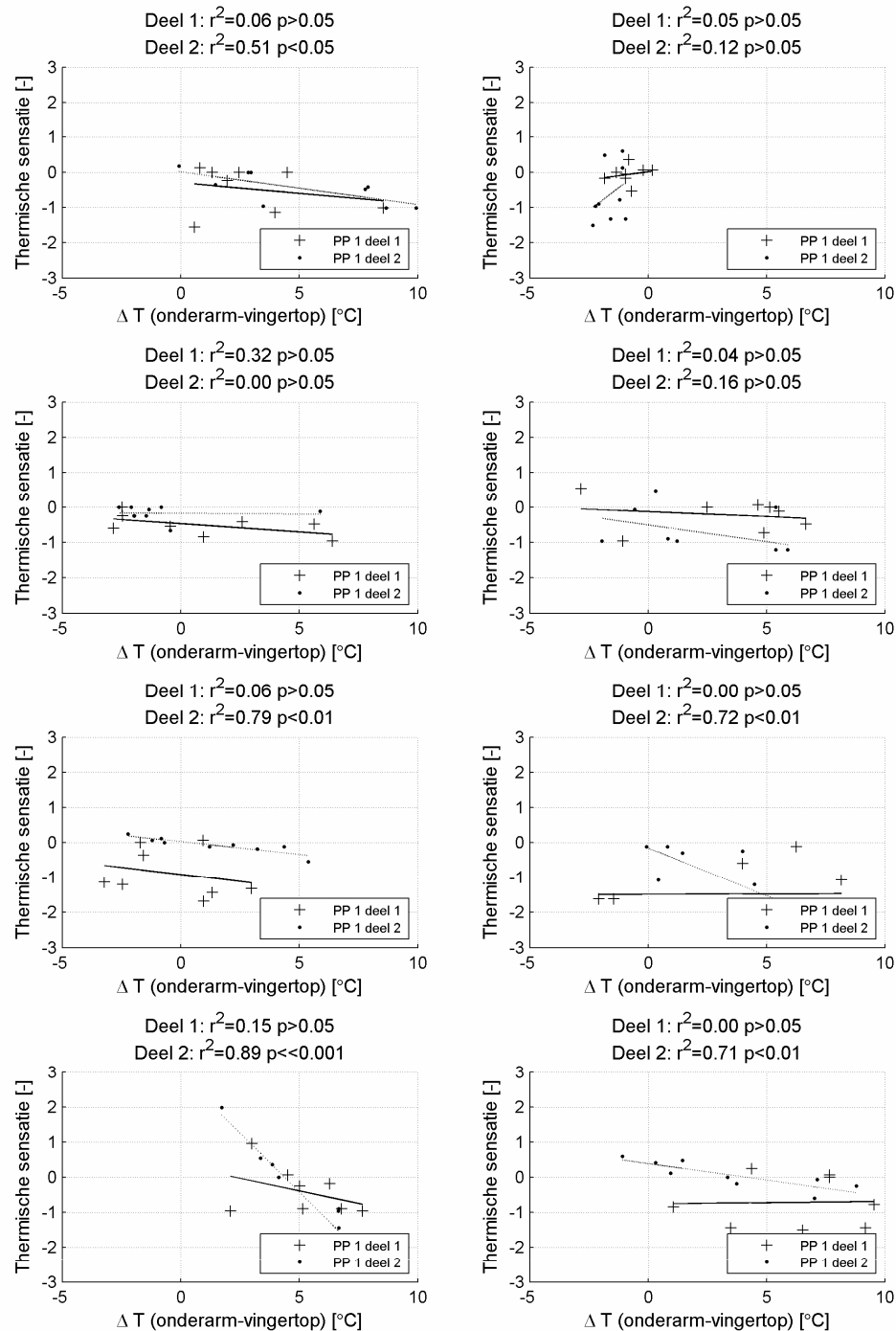


Figuur A.40: Thermische sensatie versus kerntemperatuur meetsessie 1 en 2

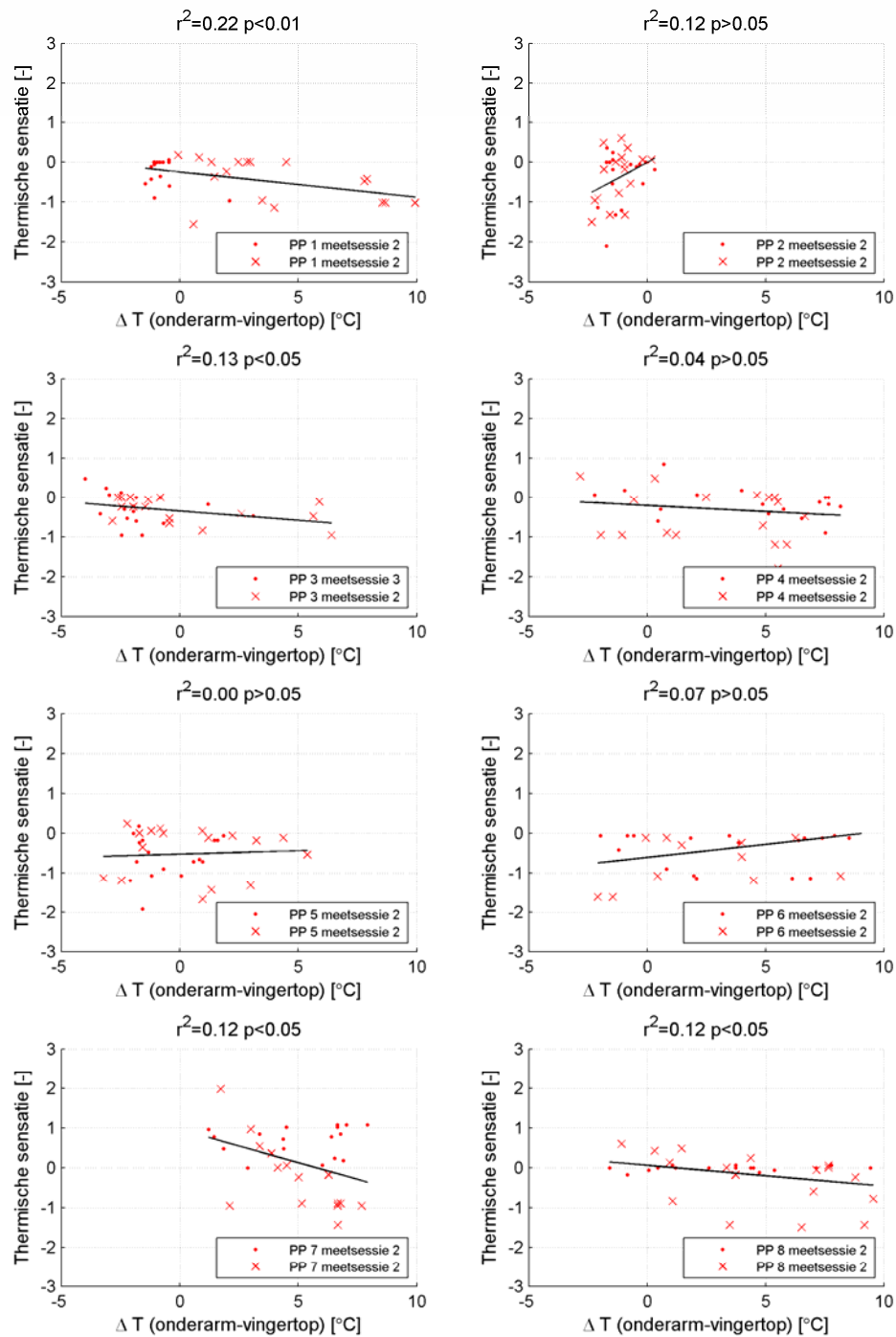


Figuur A.41: Thermische sensatie versus kerntemperatuur meetsessie 1 en 2

10.4 Thermische sensatie vs ΔT onderarm-vingertop

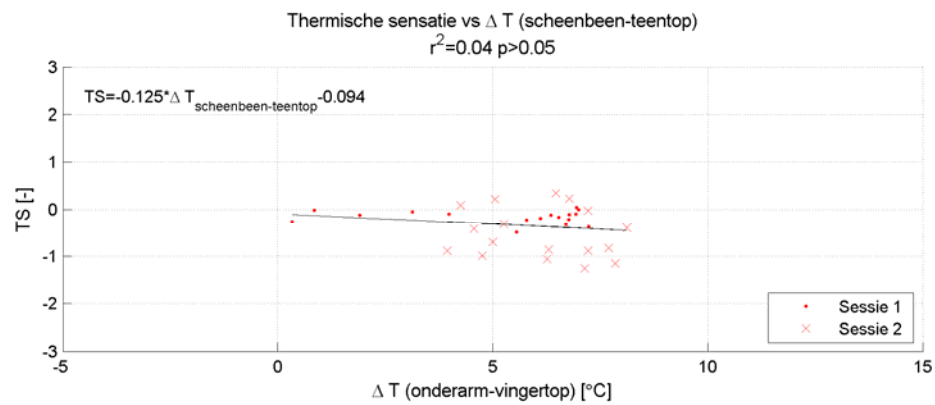


Figuur A.42: Thermische sensatie versus ΔT onderarm-vingertop meet sessie 2 (deel 1=t/m 240 min, deel 2= 240-480 min)



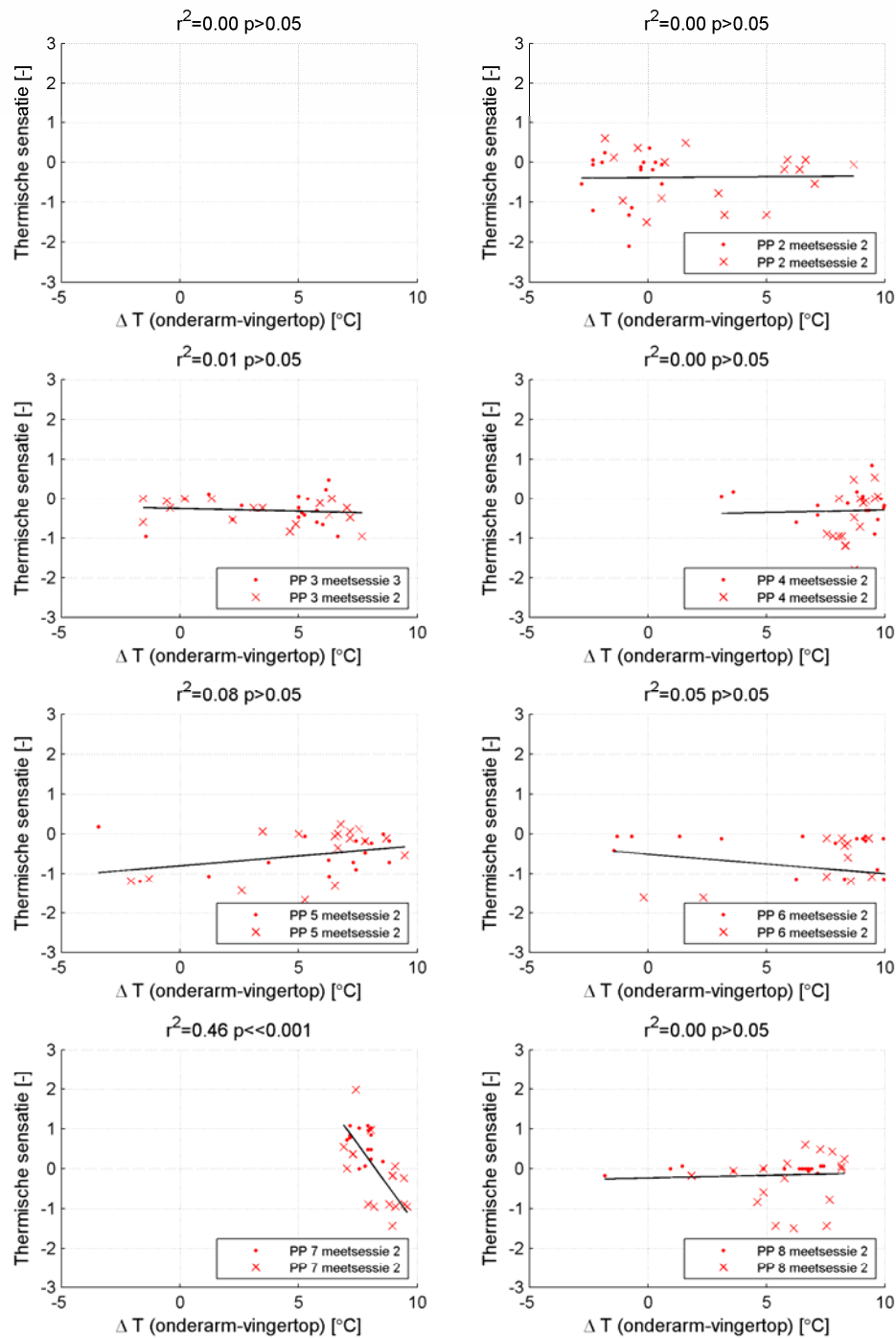
Figuur A.43: Thermische sensatie versus ΔT onderarm-vingertop meetsessie 1 en 2

10.5 Thermische sensatie vs ΔT scheenbeen-teentop



Figuur A.44: Thermische sensatie versus ΔT scheenbeen-teentop meet sessie 1 en 2 *

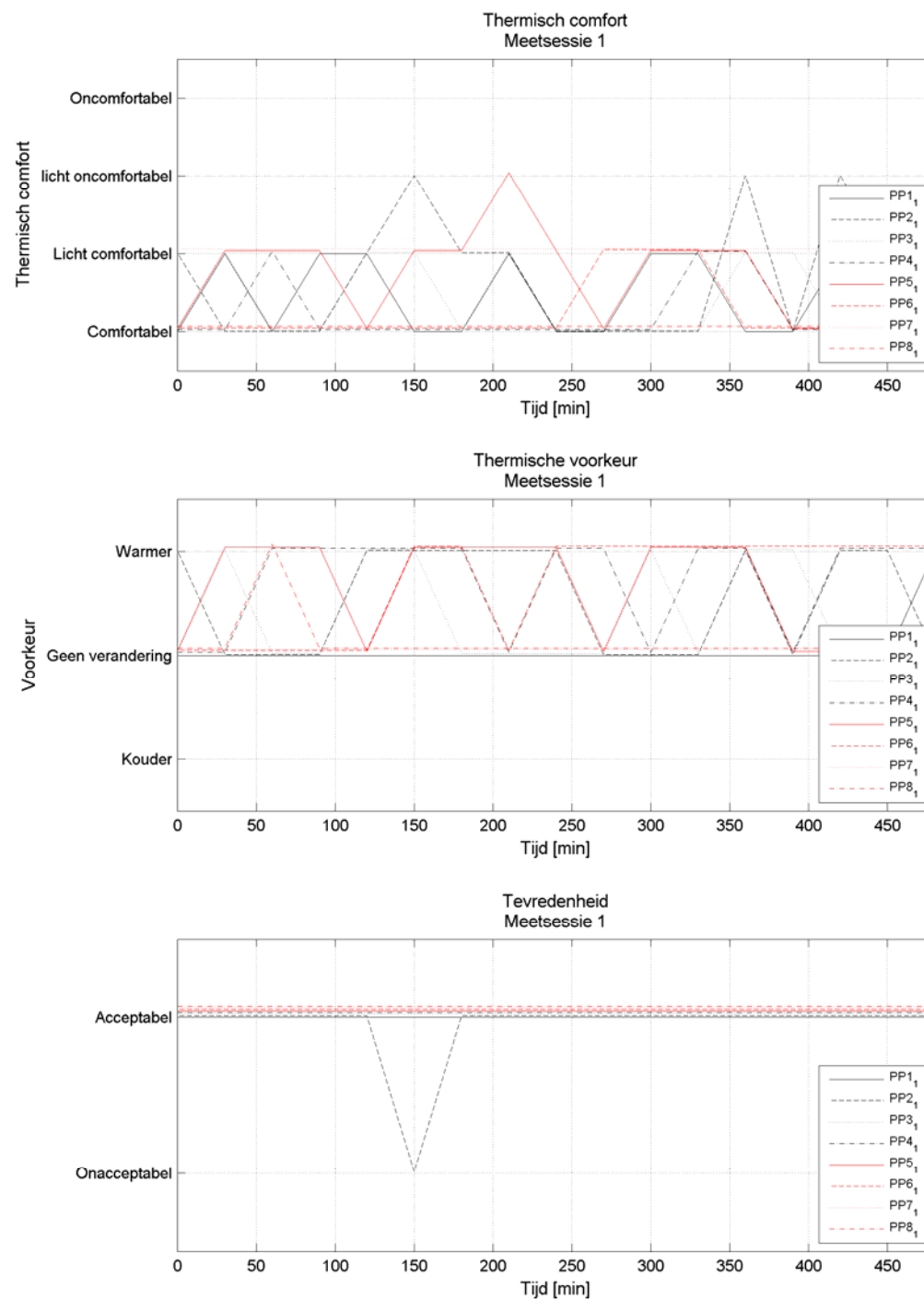
* Bij proefpersoon 1 is de temperatuur van de teen niet gemeten



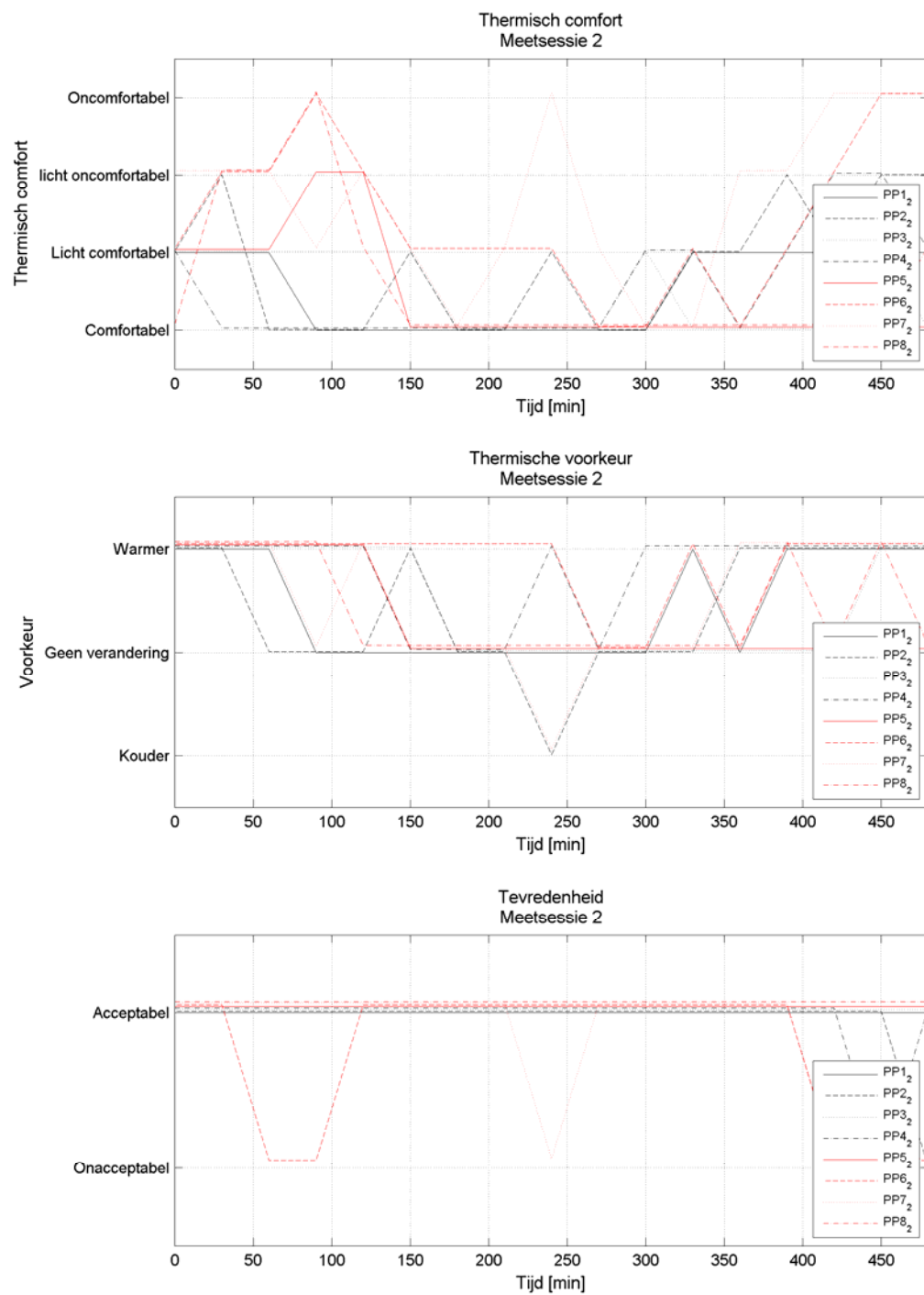
Figuur A.45: Thermische sensatie versus ΔT scheenbeen-teen top meetsessie 1 en 2*

* Bij proefpersoon 1 is de temperatuur van de teen niet gemeten

10.6 Thermisch comfort en wensen

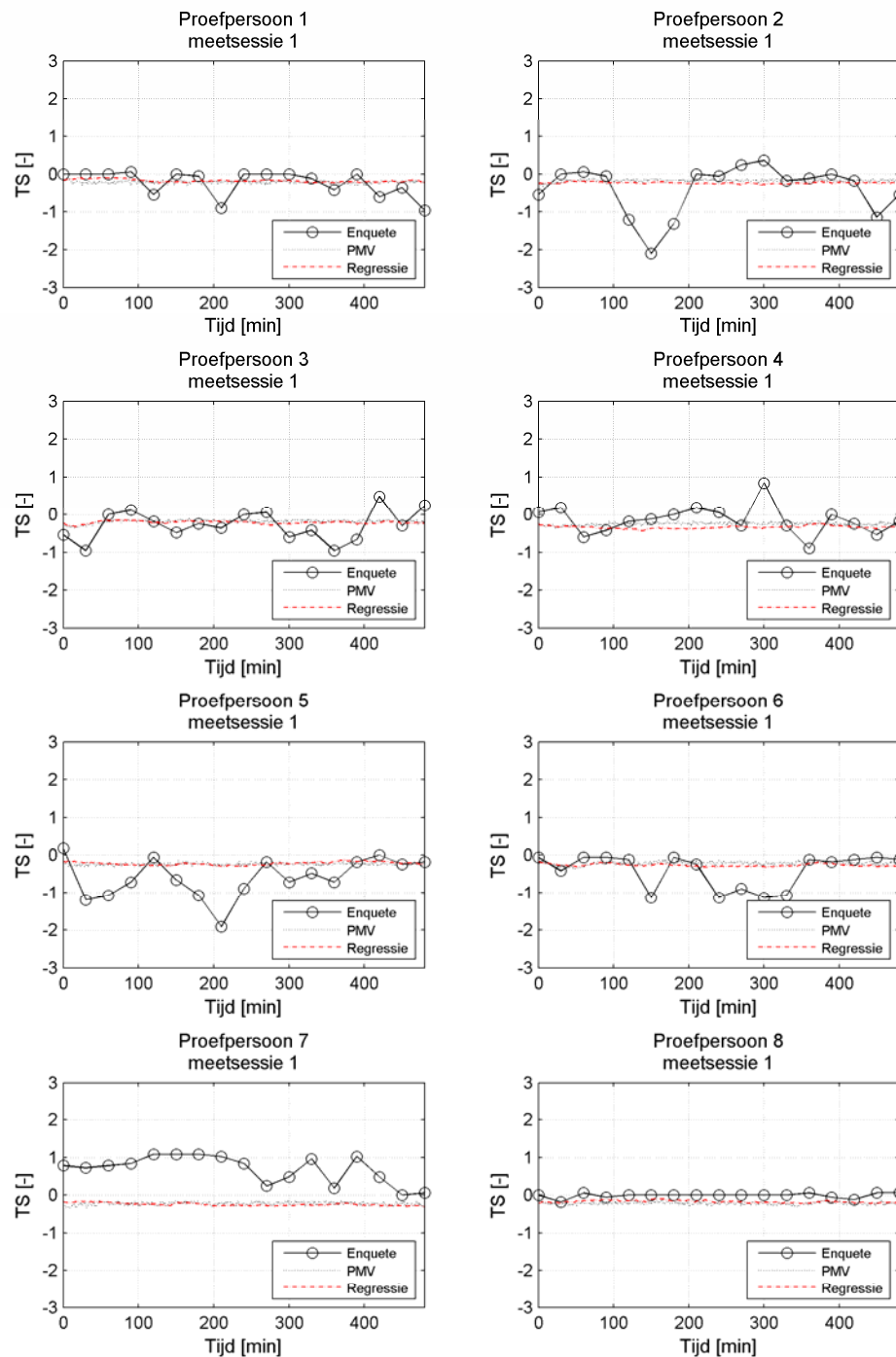


Figuur A.46: Thermisch comfort en wensen meet sessie 1

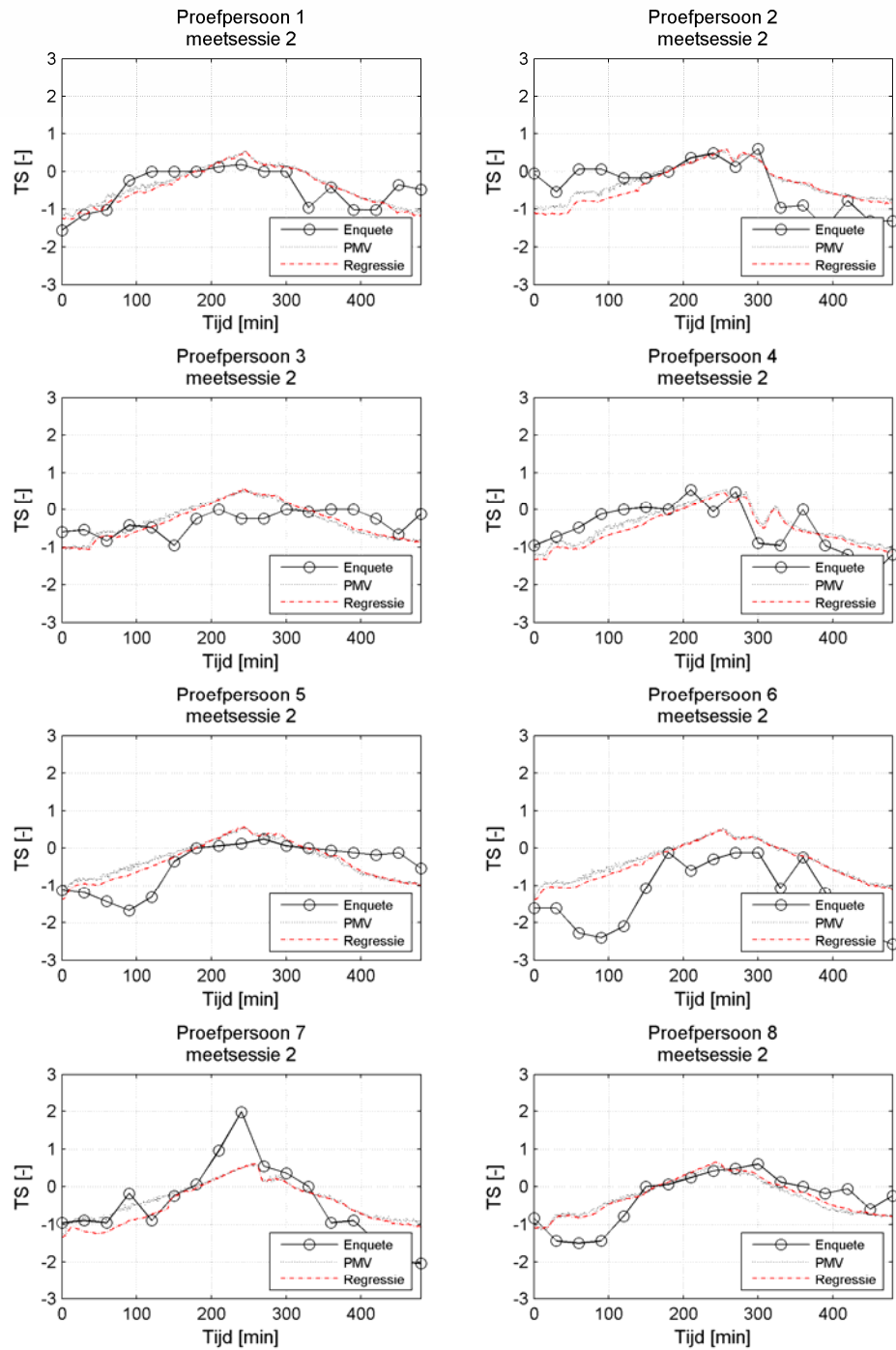


Figuur A.47: Thermisch comfort en wensen meet sessie 2

10.7 Vergelijking thermische sensatie enquête, PMV en regressie



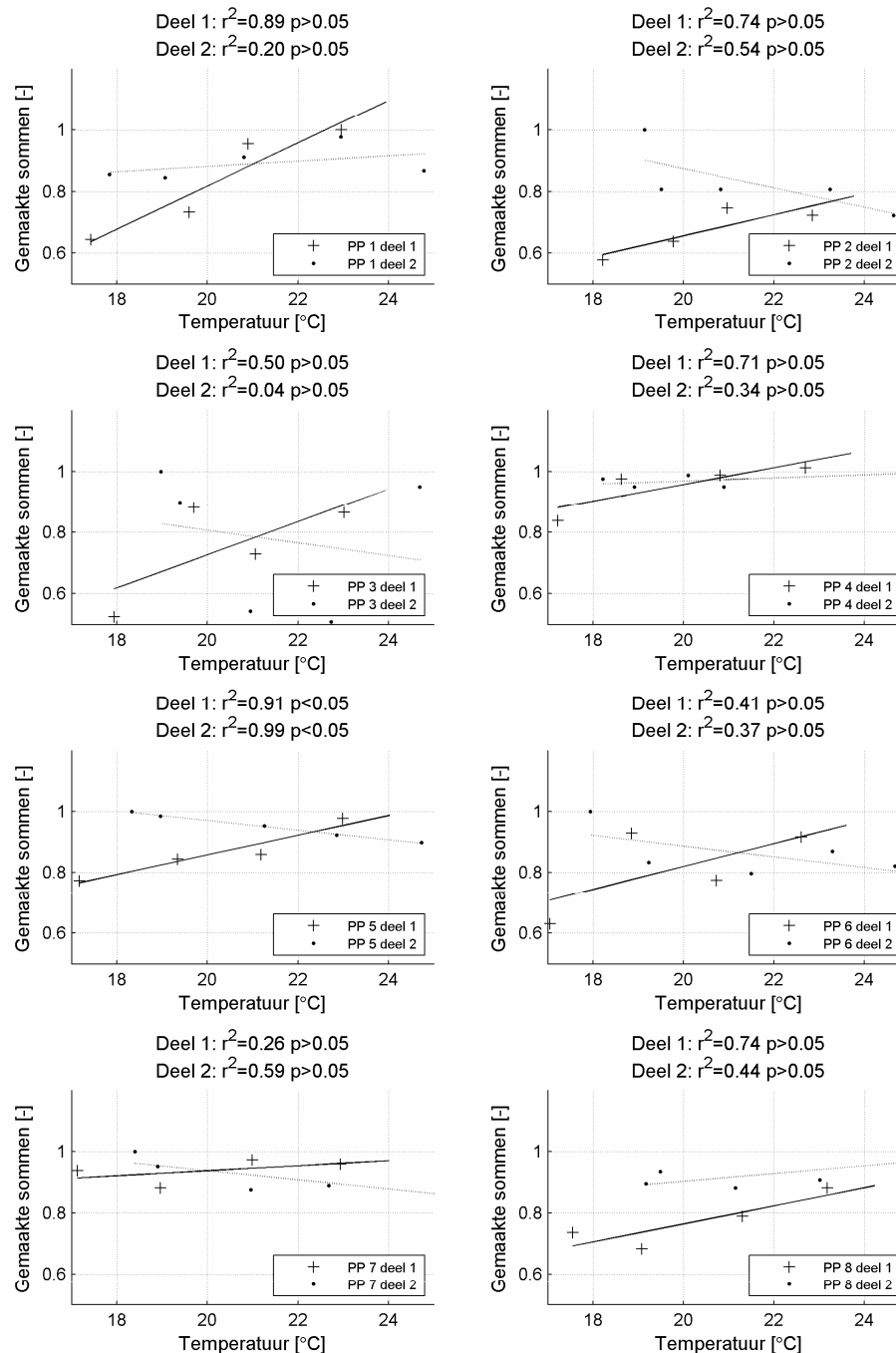
Figuur A.48: Vergelijking thermische sensatie enquête, PMV en regressie meetsessie 1



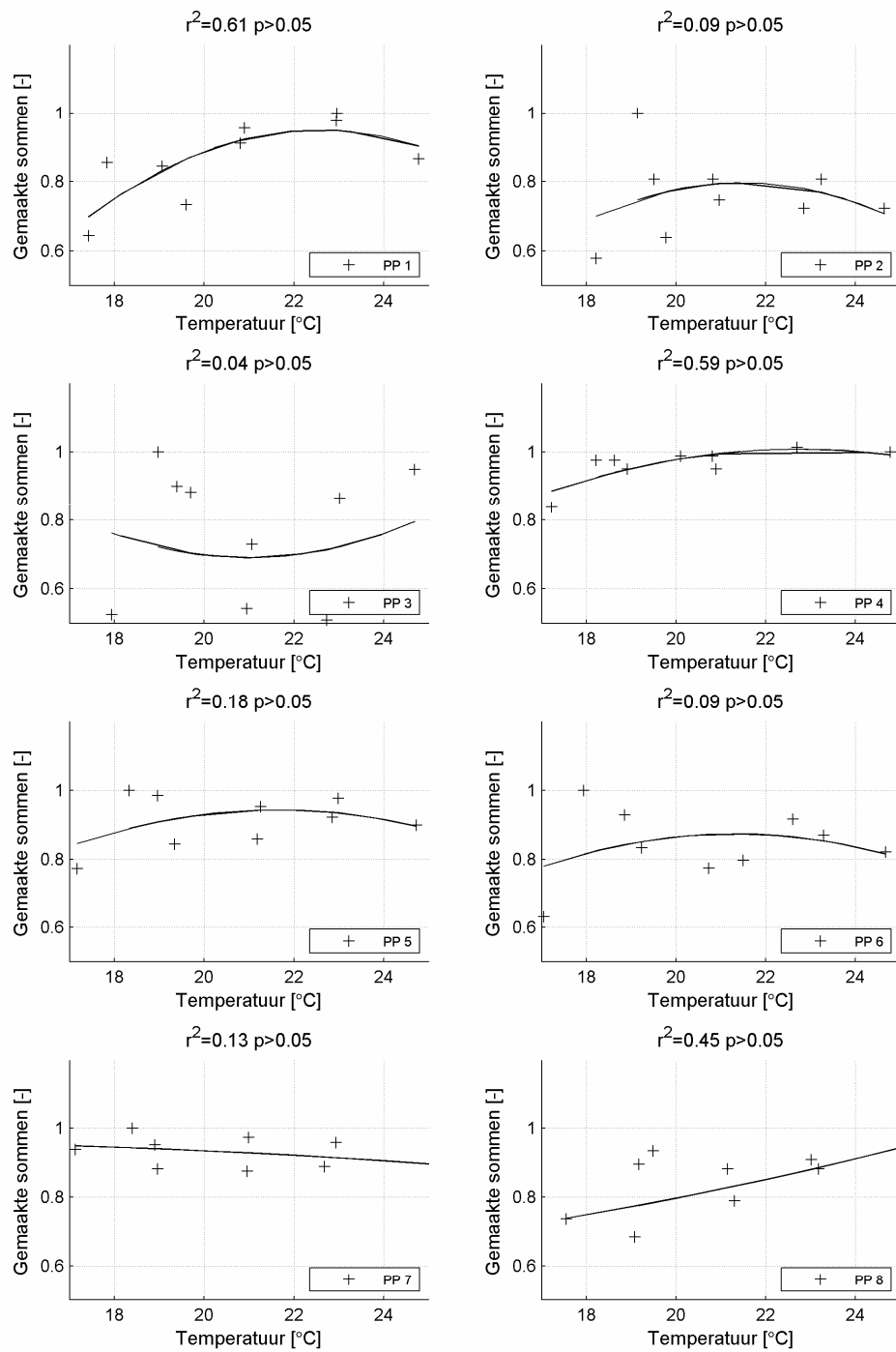
Figuur A.49: Vergelijking thermische sensatie enquête, PMV en regressie meetsessie 2

Appendix 11. Resultaten productiviteit- en prestatietesten

11.1 Gemaakte sommen vs luchttemperatuur

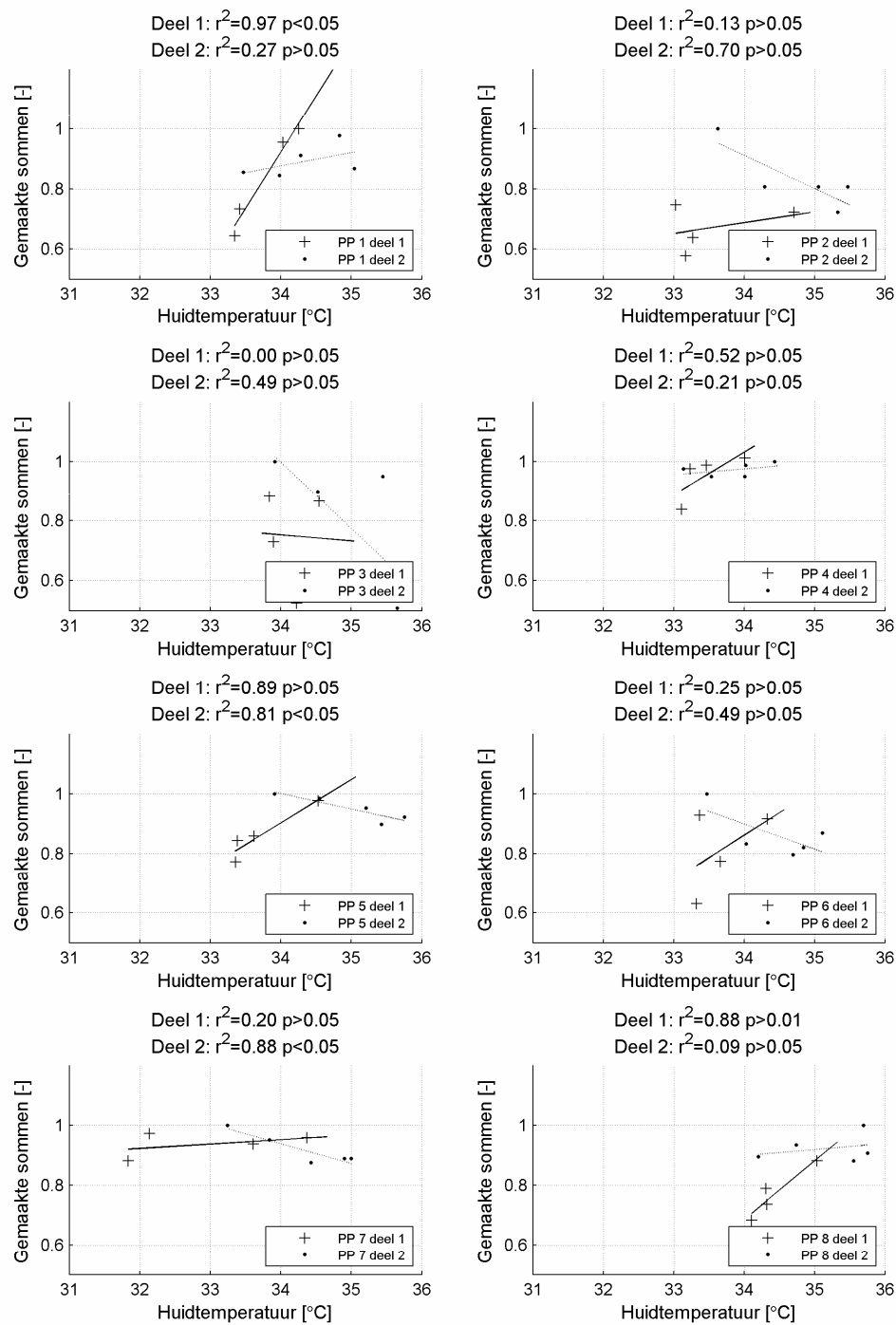


Figuur A.50: Gemaakte sommen vs luchttemperatuur (eerste deel meetsessie tot $t=240$, tweede gedeelte $t=240$ t/m $t=480$), lineaire regressie



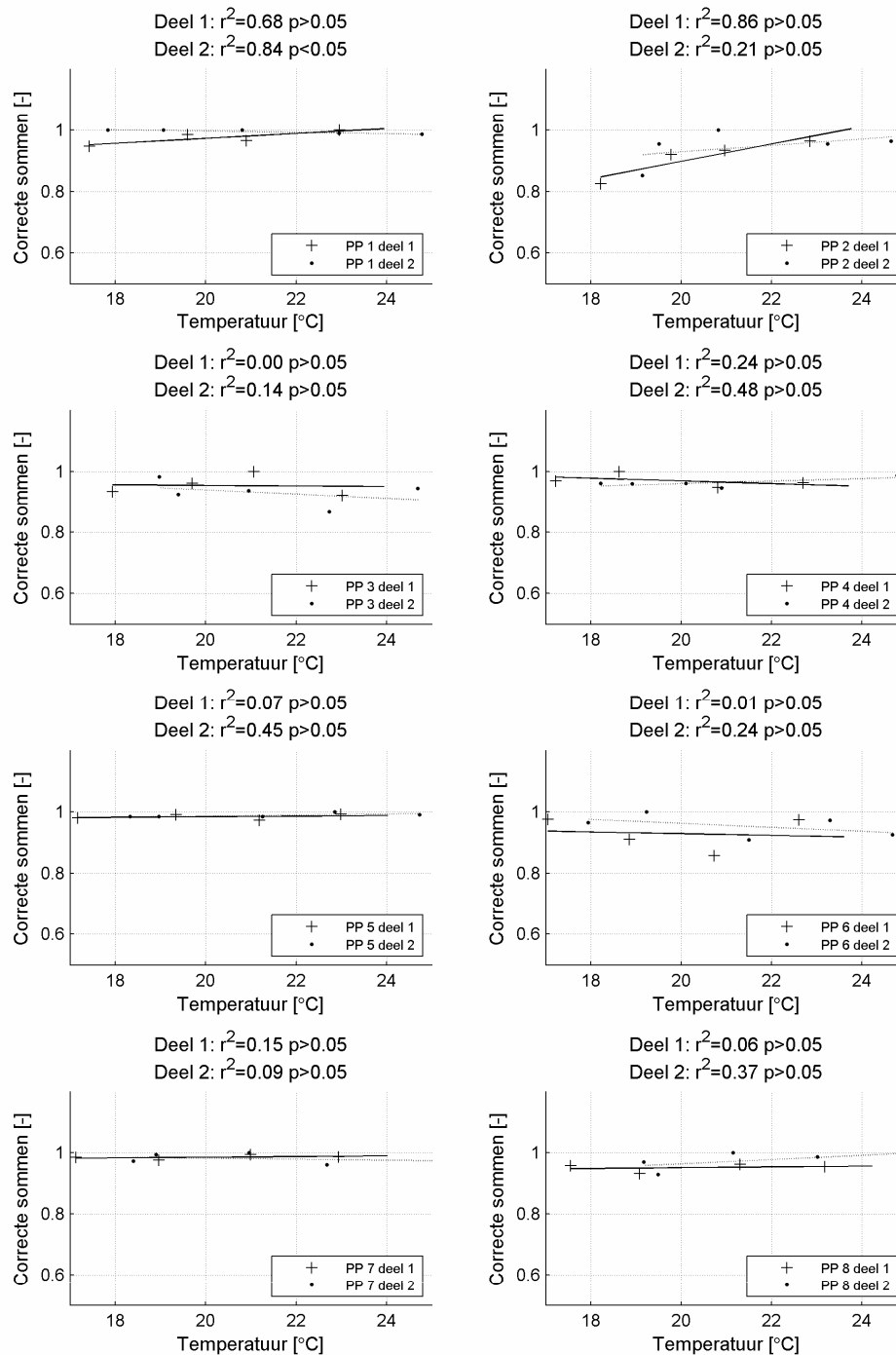
Figuur A.51: Gemaakte sommen vs luchttemperatuur meet sessie 2, kwadratische regressie

11.2 Gemaakte sommen vs huidtemperatuur

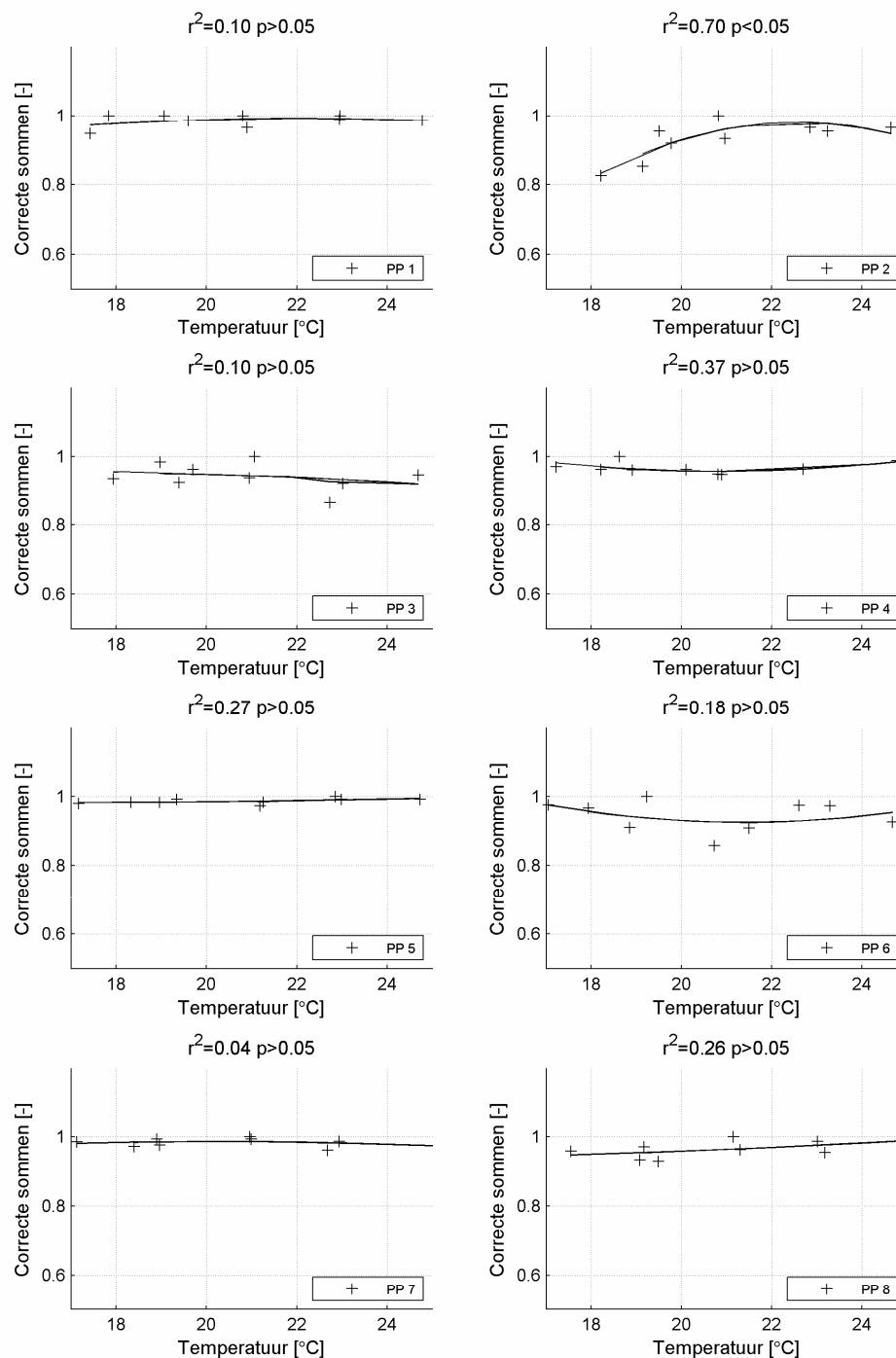


Figuur A.52: Gemaakte sommen vs huidtemperatuur (eerste deel meetsessie tot $t=240$, tweede gedeelte $t=240$ t/m $t=480$), lineaire regressie

11.3 Percentage correcte sommen vs luchttemperatuur

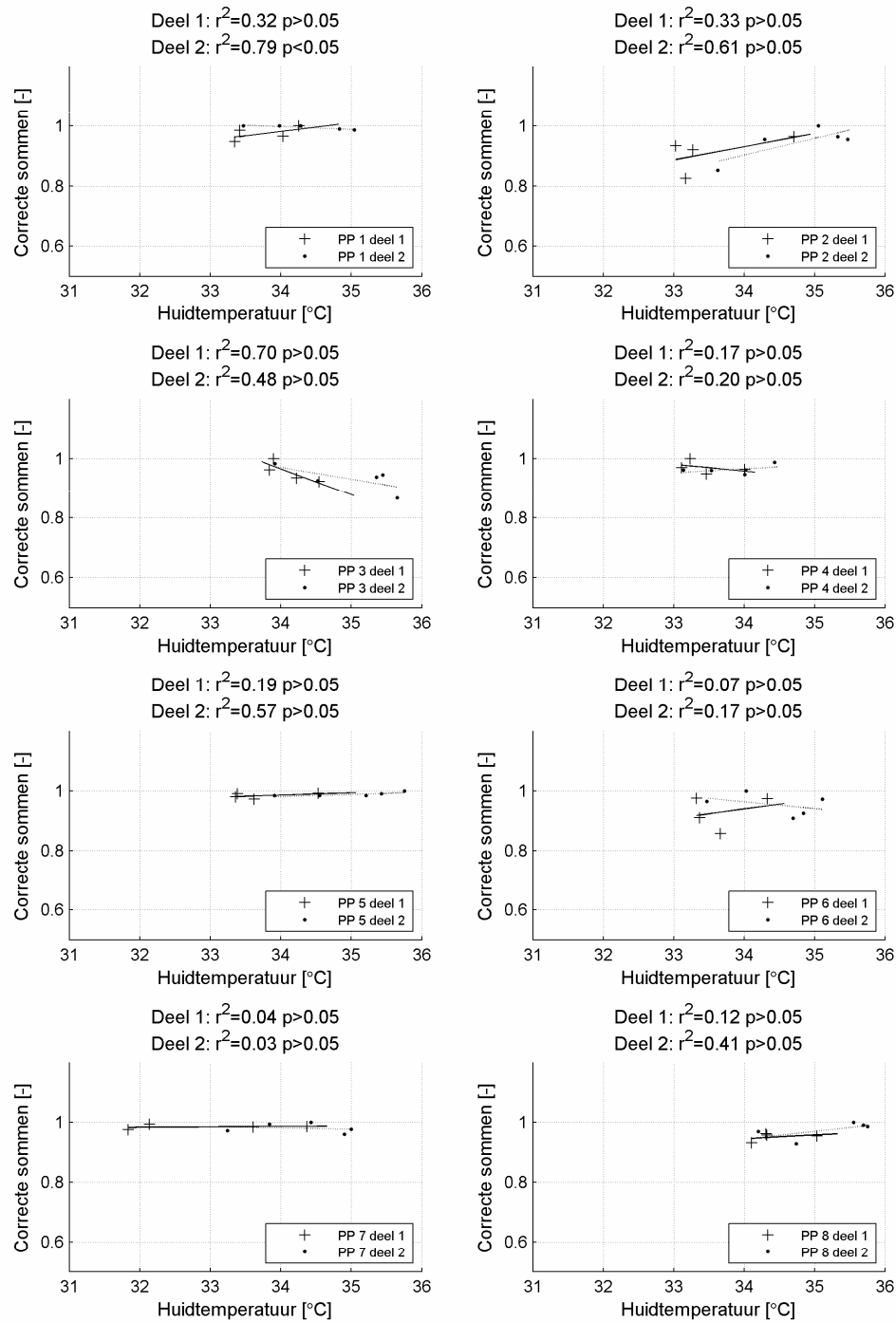


Figuur A.53: Percentage correcte sommen vs luchttemperatuur (eerste deel meetsessie tot $t=240$, tweede gedeelte $t=240$ t/m $t=480$), lineaire regressie



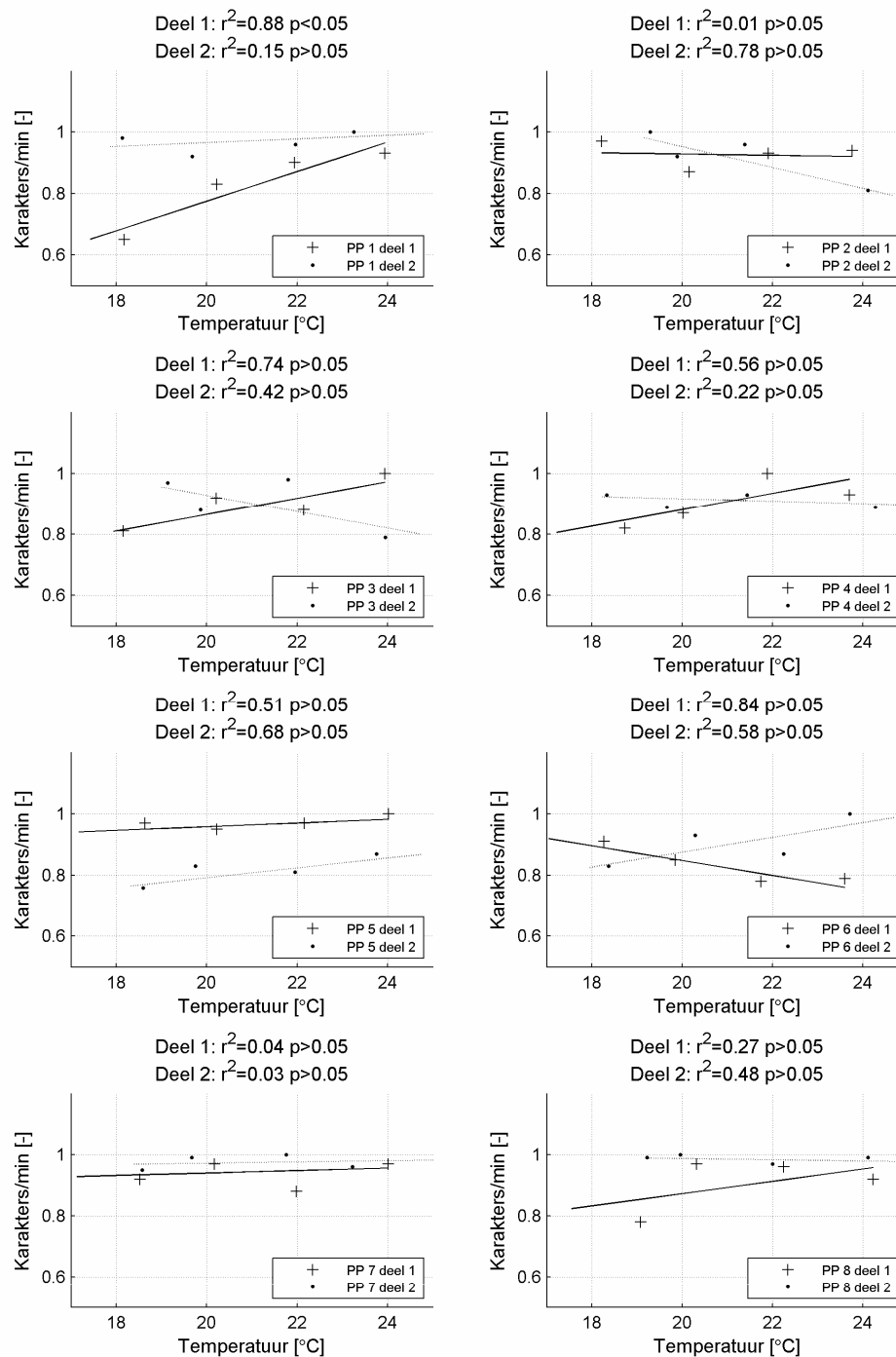
Figuur A.54: Percentage correcte sommen vs luchttemperatuur meet sessie 2, kwadratische regressie

11.4 Percentage correcte sommen vs huidtemperatuur



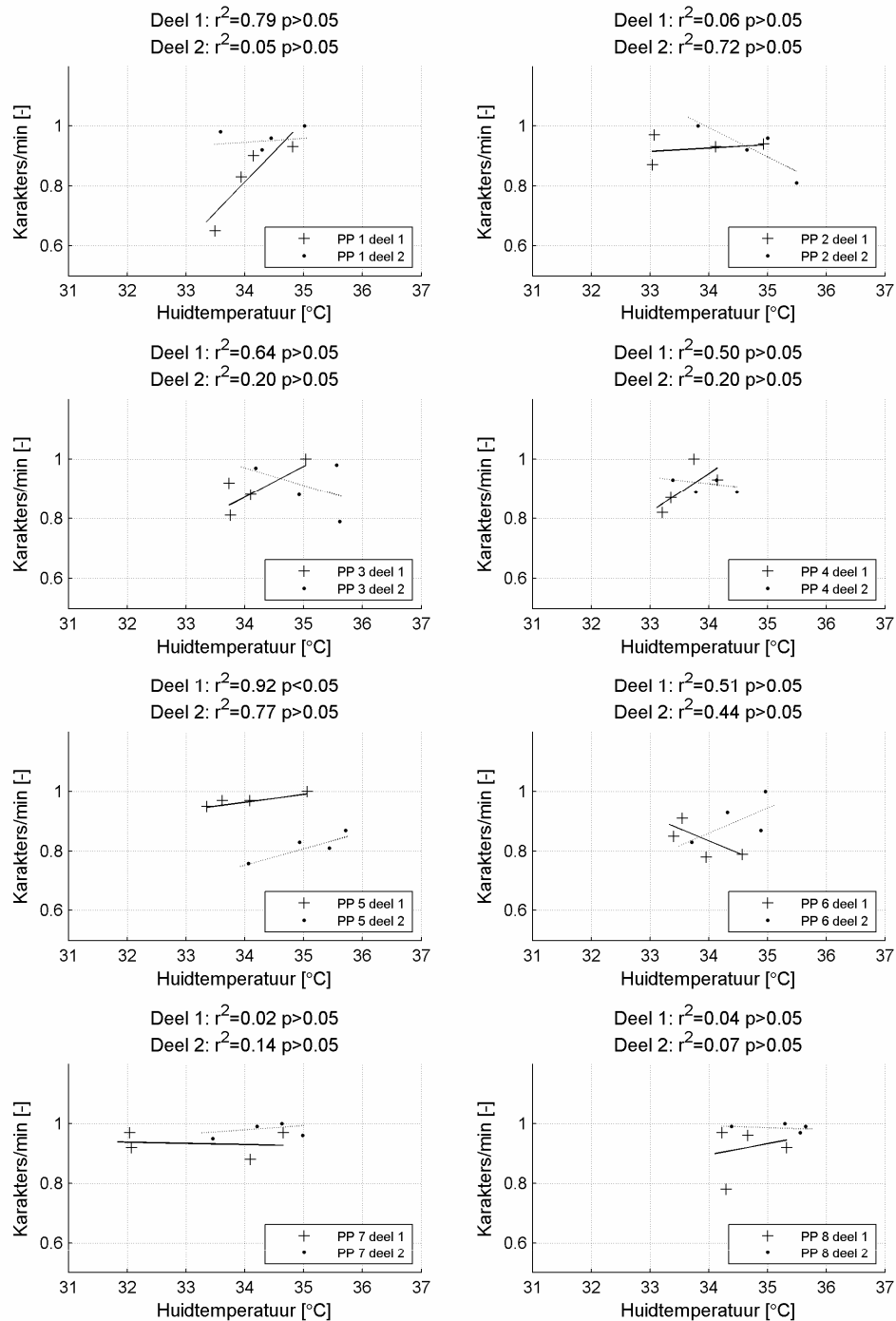
Figuur A.55: Percentage correcte sommen vs huidtemperatuur (eerste deel meetsessie tot $t=240$, tweede gedeelte $t=240$ t/m $t=480$), lineaire regressie

11.5 Getypte karakters per minuut vs luchttemperatuur



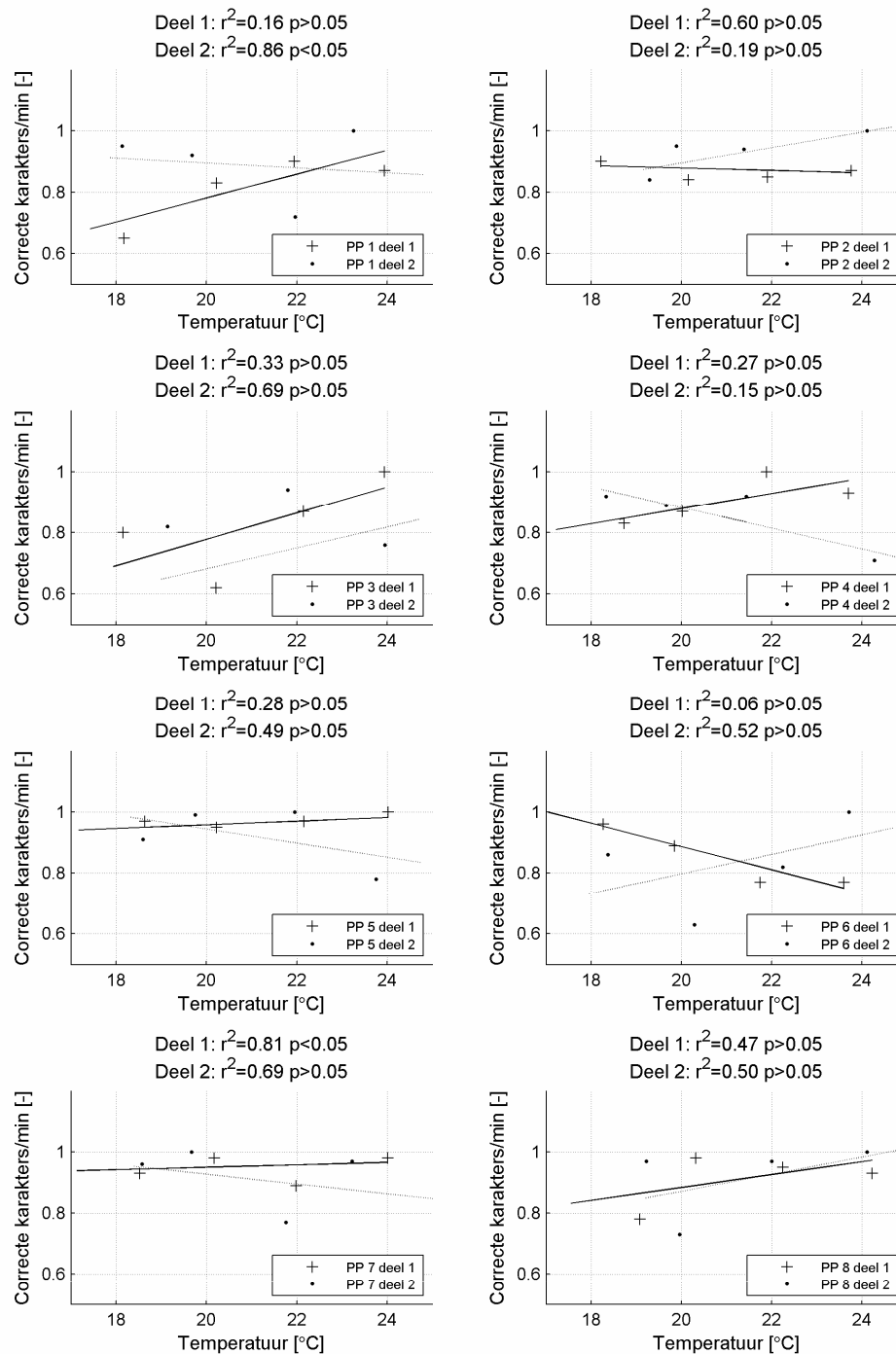
Figuur A.56: Getypte karakters per minuut vs luchttemperatuur (eerste deel meetsessie tot $t=240$, tweede gedeelte $t=240$ t/m $t=480$), lineaire regressie

11.6 Getypte karakters per minuut vs huidtemperatuur



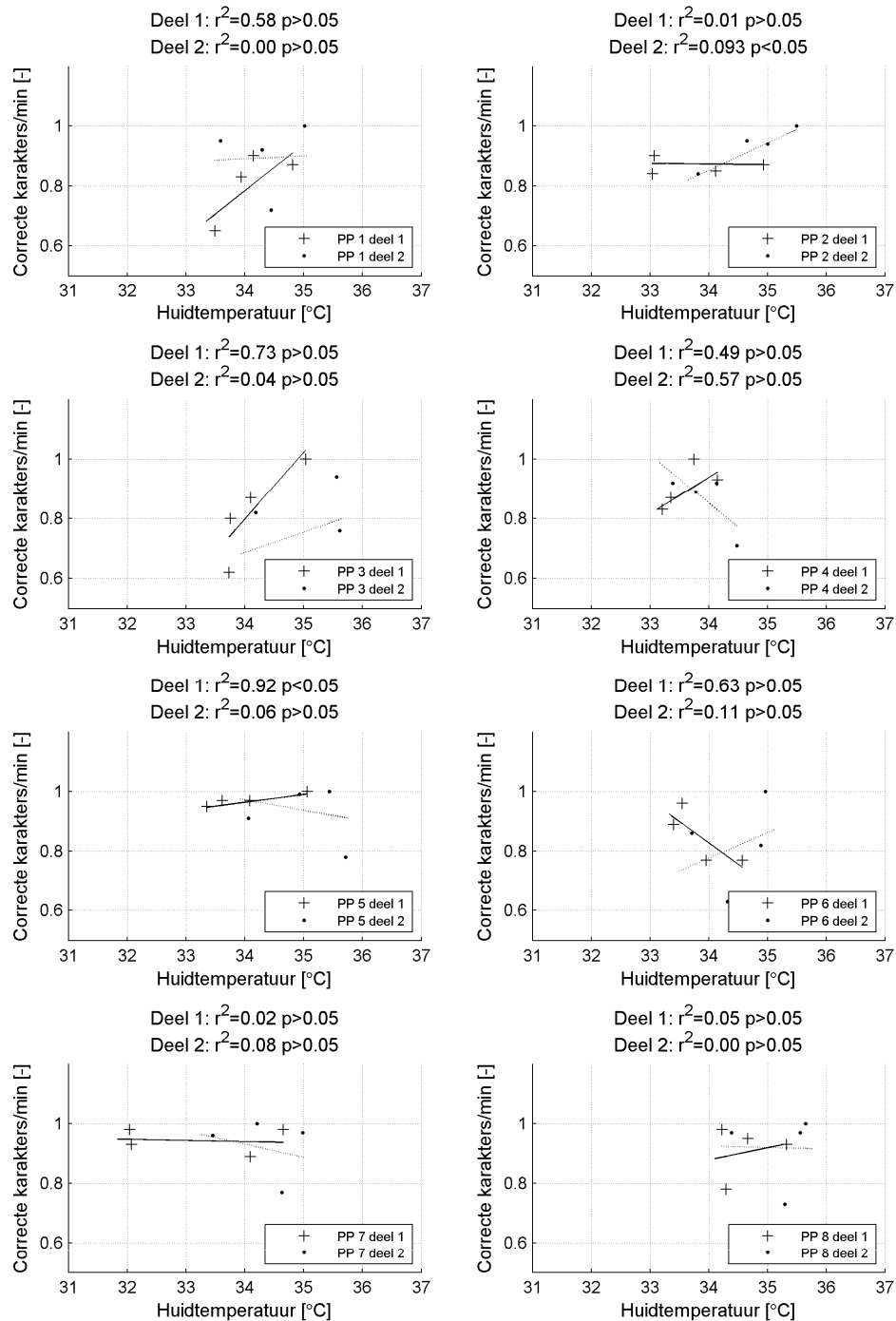
Figuur A.57: Getypte karakters per minuut vs huidtemperatuur (eerste deel meetsessie tot $t=240$, tweede gedeelte $t=240$ t/m $t=480$), lineaire regressie

11.7 Correcte karakters per minuut vs luchttemperatuur



Figuur A.58: Correcte karakters per minuut vs luchttemperatuur (eerste deel meet sessie tot $t=240$, tweede gedeelte $t=240$ t/m $t=480$), lineaire regressie

11.8 Correcte karakters per minuut vs huidtemperatuur



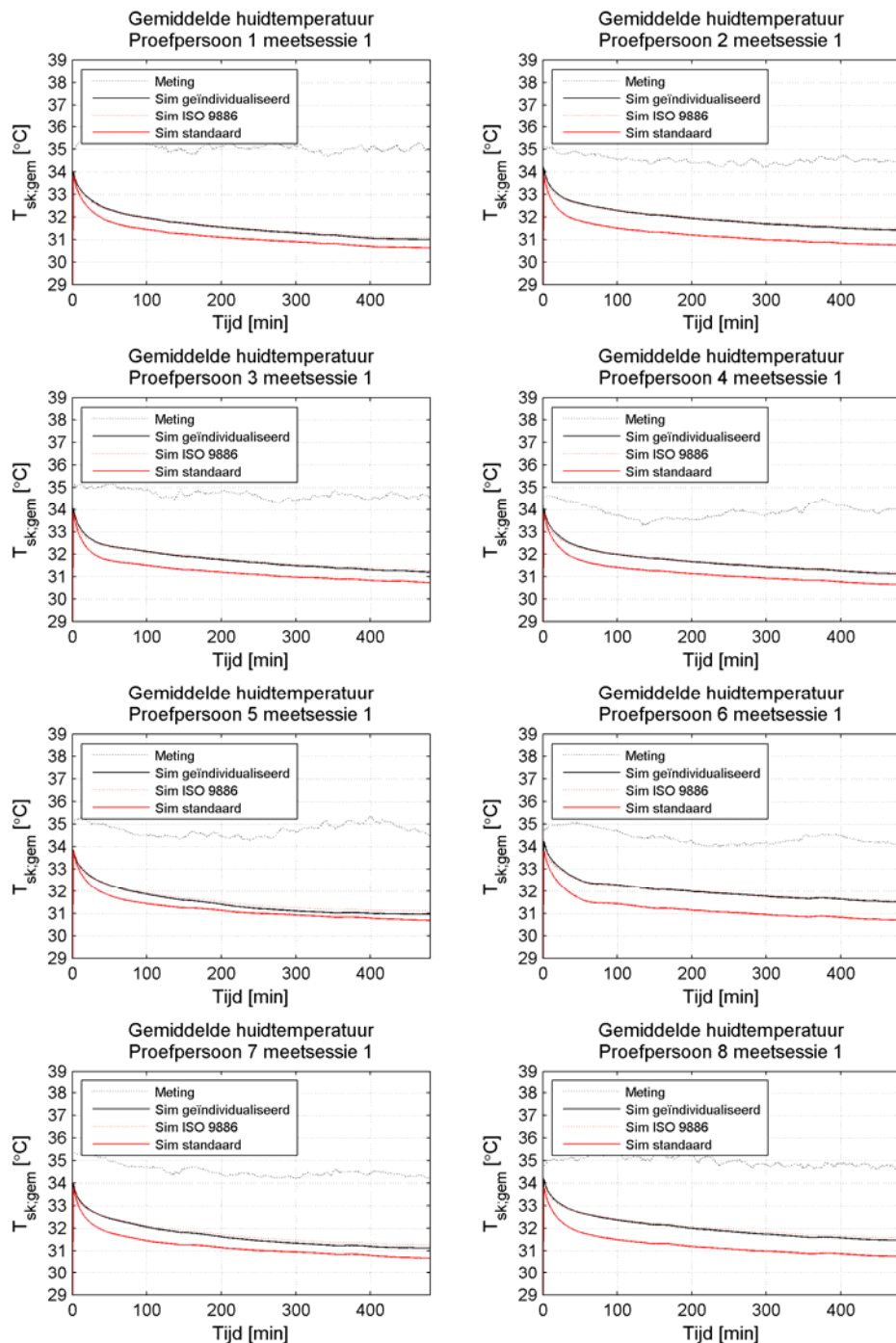
Figuur A.59: Correcte karakters per minuut vs huidtemperatuur (eerste deel meetsessie tot $t=240$, tweede gedeelte $t=240$ t/m $t=480$), lineaire regressie

Appendix 12. Vergelijking simulatie- en meetresultaten

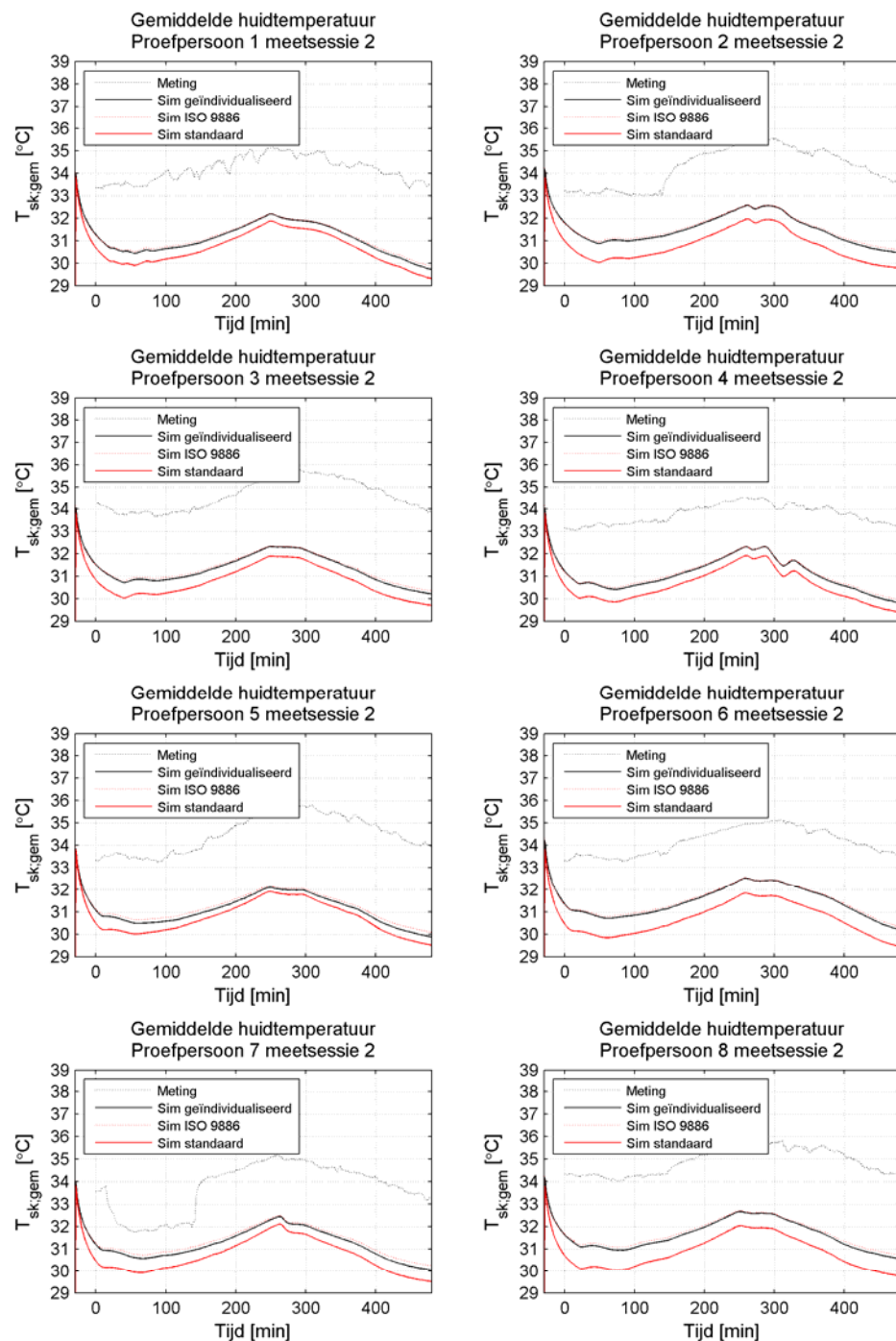
12.1 Resultaten gesimuleerde gemiddelde huidtemperaturen

Tabel A.19: Gemiddelde afwijking tussen gemeten en gesimuleerde gemiddelde huidtemperatuur ($T_{\text{meting}} - T_{\text{simulatie}}$) voor individuele lichaamskenmerken

	mean $\pm$ stdev min-max		
	Meetsessie 1	Meetsessie 2	
PP1₁	3,63 $\pm$ 1,50 0,98 –4,25 3,93	3,15 $\pm$ 0,32 2,09 –3,83 3,16	
PP2₁	2,64 $\pm$ 1,53 0,95 –3,20 3,06	2,82 $\pm$ 0,57 1,42 –3,69 2,88	
PP3₁	3,02 $\pm$ 1,51 1,04 –3,54 3,38	3,36 $\pm$ 0,43 2,78 –4,16 3,39	
PP4₁	2,30 $\pm$ 1,56 0,98 –3,16 2,78	2,75 $\pm$ 0,37 1,93 –3,46 2,77	
PP5₁	3,33 $\pm$ 1,57 1,27 –4,34 3,68	3,48 $\pm$ 0,52 2,27 –4,32 3,52	
PP6₁	2,47 $\pm$ 1,51 0,46 –2,88 2,89	2,76 $\pm$ 0,25 1,98 –3,41 2,77	
PP7₁	2,95 $\pm$ 1,51 1,37 –3,42 3,32	2,56 $\pm$ 0,79 1,08 –3,44 2,68	
PP8₁	3,02 $\pm$ 1,51 0,53 –3,40 3,37	3,33 $\pm$ 0,32 2,73 –4,04 3,34	
mean	2,92 $\pm$ 1,52 0,89 –3,40 3,29	3,02 $\pm$ 0,38 2,20 –3,65 3,05	2,97 $\pm$ 1,11 0,89 –3,65 4,49



Figuur A.60: Gesimuleerde gemiddelde huidtemperaturen meetsessie 1

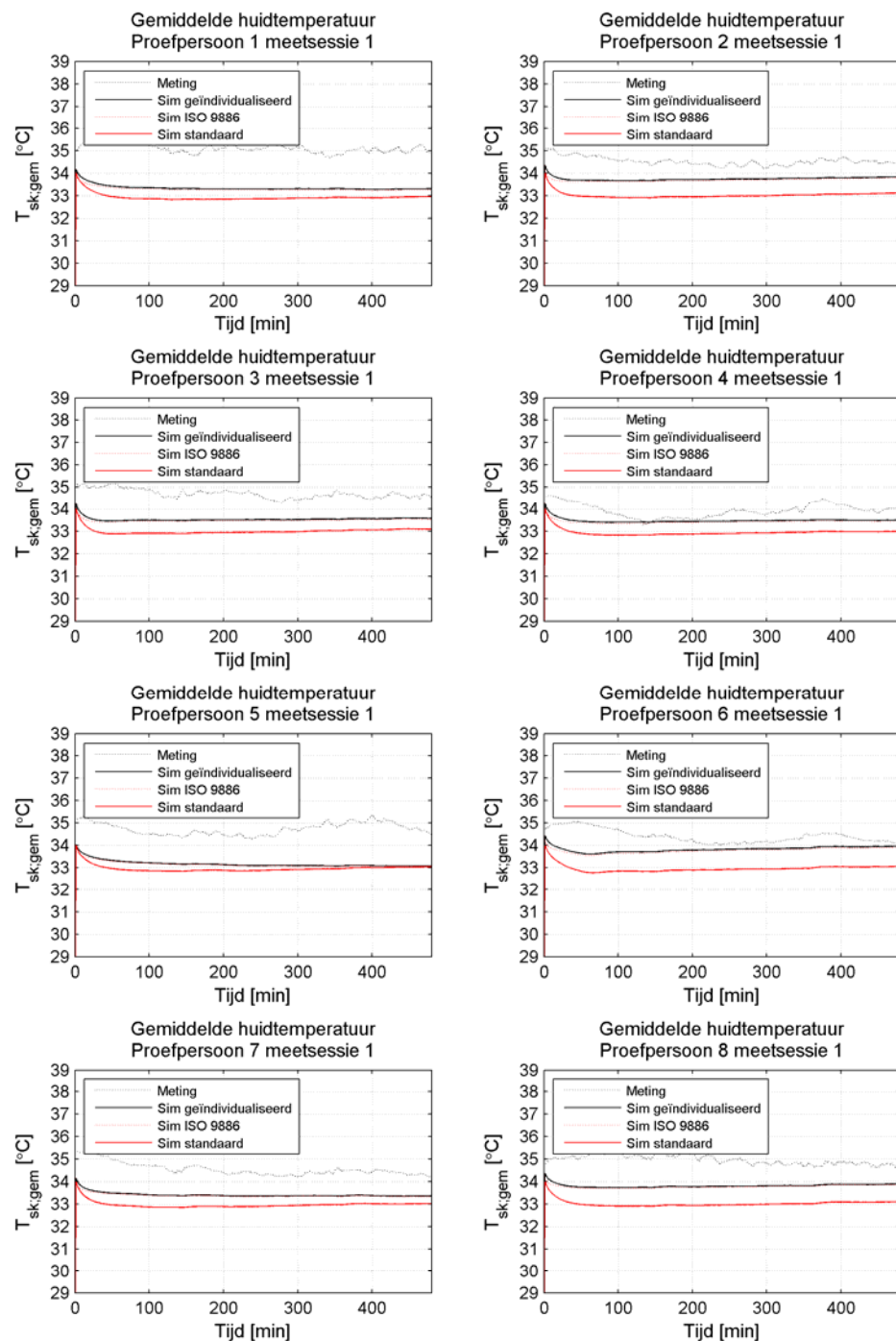


Figuur A.61: Gesimuleerde gemiddelde huidtemperaturen meet sessie 2

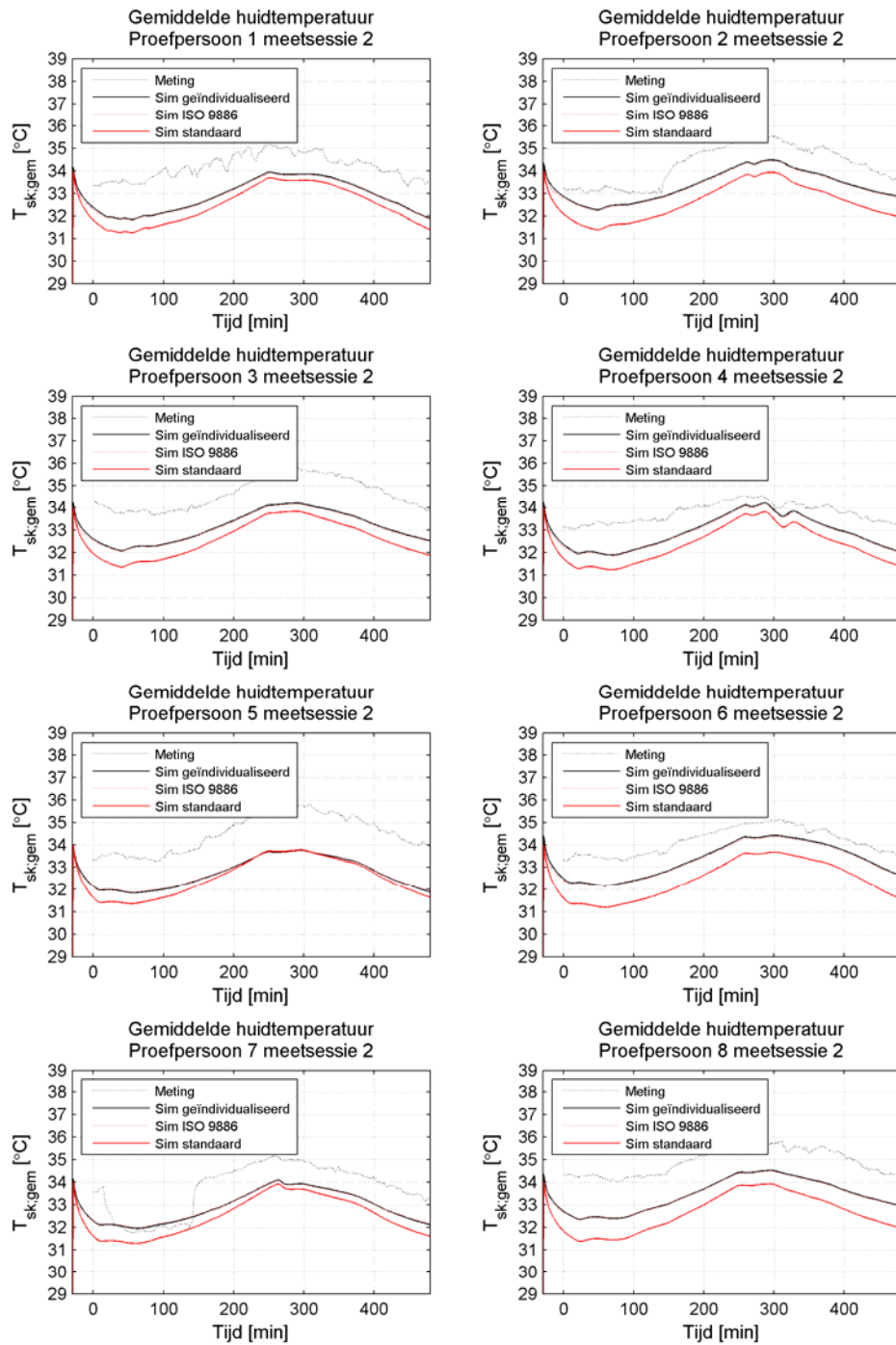
12.2 Resultaten gesimuleerde gemiddelde huidtemperaturen $v_a=0,05$ m/s

Tabel A.20: Gemiddelde afwijking tussen gemeten en gesimuleerde gemiddelde huidtemperatuur ($T_{\text{meting}} - T_{\text{simulatie}}$) voor individuele lichaamskenmerken, $v_a=0,05$ m/s

	mean ± stdev min-max		
	Meetsessie 1	Meetsessie 2	
PP1 ₁	1,80 ±0,25 0,80 –2,44 1,82	1,31 ±0,30 0,63 –1,97 1,35	
PP2 ₁	0,78 ±0,18 0,46 –1,23 0,80	0,93 ±0,28 0,16 –1,38 0,97	
PP3 ₁	1,17 ±0,21 0,75 –1,69 1,19	1,49 ±0,15 1,19 –1,78 1,50	
PP4 ₁	0,45 ±0,26 -0,14 –0,95 0,52	0,88 ±0,33 0,16 –1,43 0,94	
PP5 ₁	1,57 ±0,26 1,10 –2,24 1,59	1,78 ±0,23 1,19 –2,17 1,79	
PP6 ₁	0,58 ±0,35 0,13 –1,39 0,67	0,84 ±0,25 0,32 –1,34 0,88	
PP7 ₁	1,14 ±0,21 0,82 –1,74 1,16	0,82 ±0,58 -0,42 –1,68 1,01	
PP8 ₁	1,15 ±0,25 0,35 –1,59 1,18	1,46 ±0,21 0,96 –1,94 1,47	
mean	1,08 ±0,16 0,72 –1,50 1,09	1,19 ±0,10 0,92 –1,42 1,19	1,14 ±0,10 0,72 –1,50 1,19



Figuur A.62: Gesimuleerde gemiddelde huidtemperaturen meetsessie 1, $v_a=0,05$ m/s

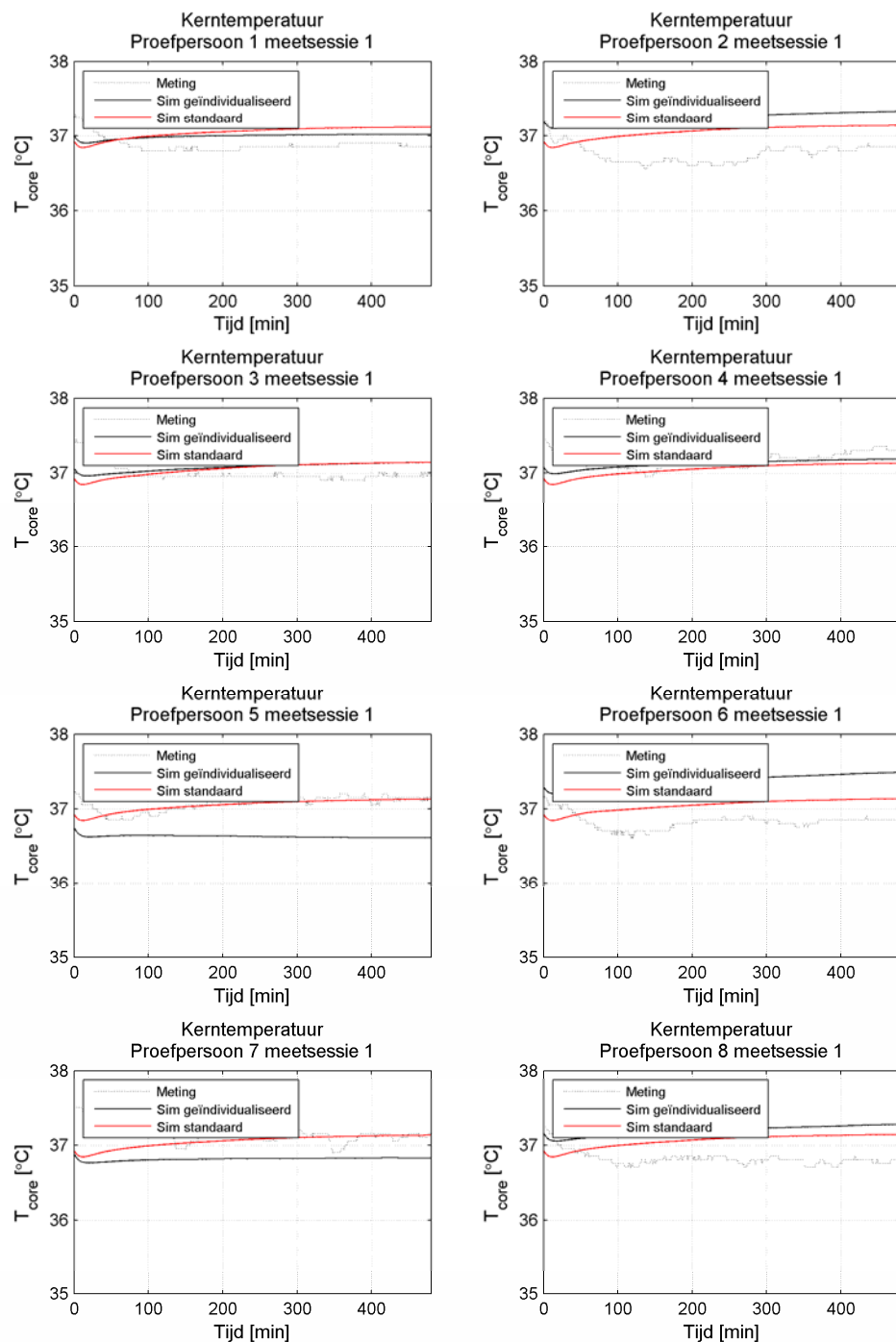


Figuur A.63: Gesimuleerde gemiddelde huidtemperaturen meetsessie 2, $v_a=0,05$ m/s

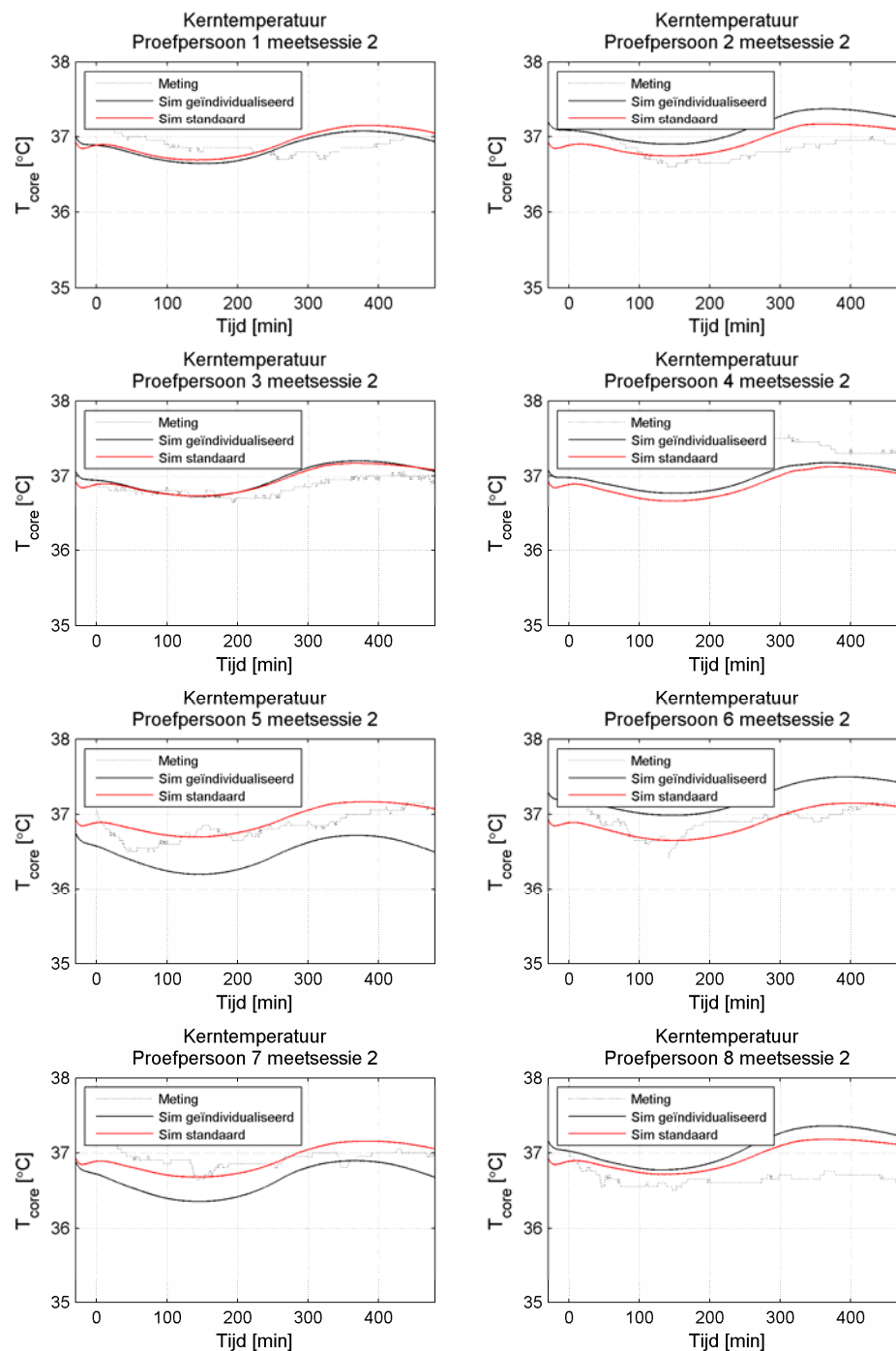
12.3 Resultaten gesimuleerde gemiddelde kerntemperaturen

Tabel A.21: Gemiddelde afwijking tussen gemeten en gesimuleerde kerntemperatuur ($T_{\text{meting}} - T_{\text{simulatie}}$) voor individuele lichaamskenmerken, $v_a = 0,05 \text{ m/s}$

	mean $\pm$ stdev min-max		
	Meetsessie 1	Meetsessie 2	
PP1₁	-0,12 $\pm$ 0,11 -0,20 – 0,34 0,16	0,03 $\pm$ 0,19 -0,33 – 0,37 0,19	
PP2₁	-0,49 $\pm$ 0,14 -0,67 – 0,05 0,51	-0,27 $\pm$ 0,20 -0,53 – 0,27 0,34	
PP3₁	-0,08 $\pm$ 0,15 -0,22 – 0,44 0,17	-0,12 $\pm$ 0,10 -0,29 – 0,09 0,15	
PP4₁	0,06 $\pm$ 0,10 -0,15 – 0,42 0,11	0,47 $\pm$ 0,20 0,13 – 0,97 0,51	
PP5₁	0,44 $\pm$ 0,11 0,21 – 0,59 0,46	0,36 $\pm$ 0,14 0,09 – 0,65 0,39	
PP6₁	-0,55 $\pm$ 0,13 -0,71 – -0,09 0,56	-0,30 $\pm$ 0,14 -0,58 – 0,16 0,33	
PP7₁	0,34 $\pm$ 0,13 0,08 – 0,73 0,37	0,30 $\pm$ 0,16 -0,09 – 0,64 0,34	
PP8₁	-0,38 $\pm$ 0,14 -0,55 – 0,14 0,40	-0,41 $\pm$ 0,20 -0,70 – 0,06 0,46	
mean	-0,10 $\pm$ 0,20 -0,71 – 0,44 0,36	0,48 $\pm$ 0,22 -0,70 – 0,97 0,34	0,19 $\pm$ 0,51 -0,71 – 0,97 0,34

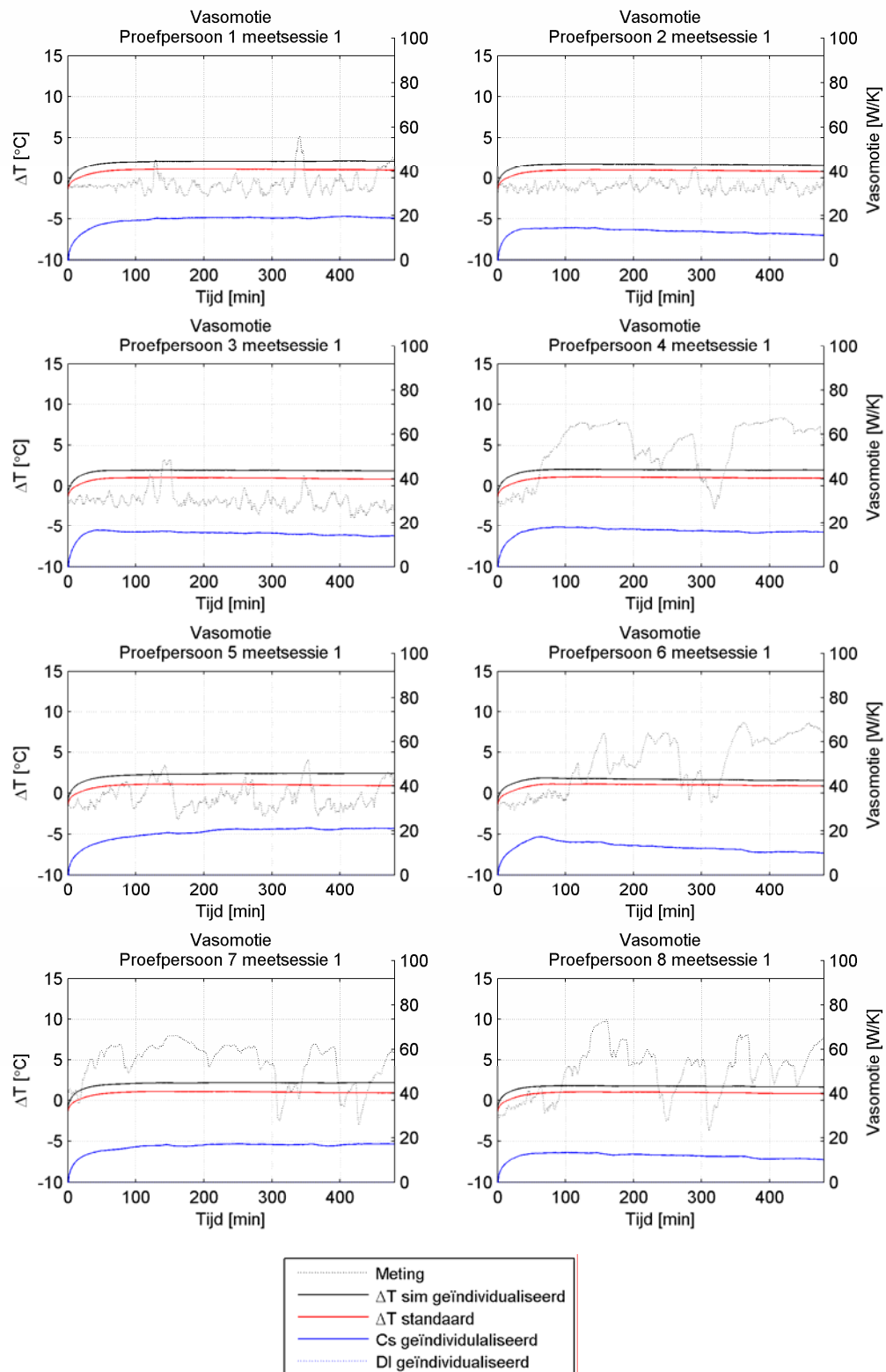


Figuur A.64: Gesimuleerde kerntemperaturen meetsessie 1, $v_a=0,05$ m/s

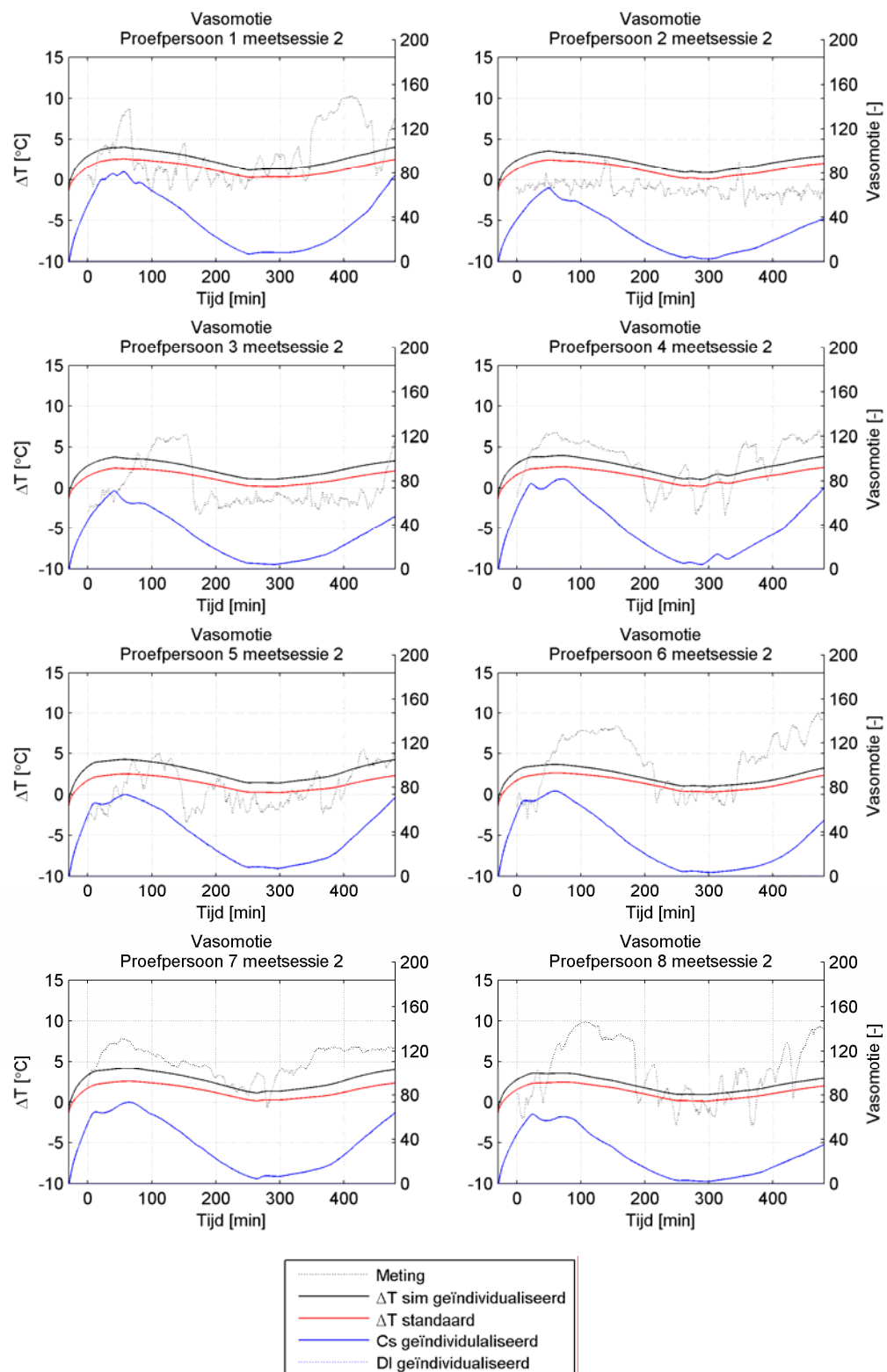


Figuur A.65: Gesimuleerde kerntemperaturen meetsessie 2, $v_a=0,05$ m/s

12.4 Gesimuleerde vasomotie onderarm-vingertop,

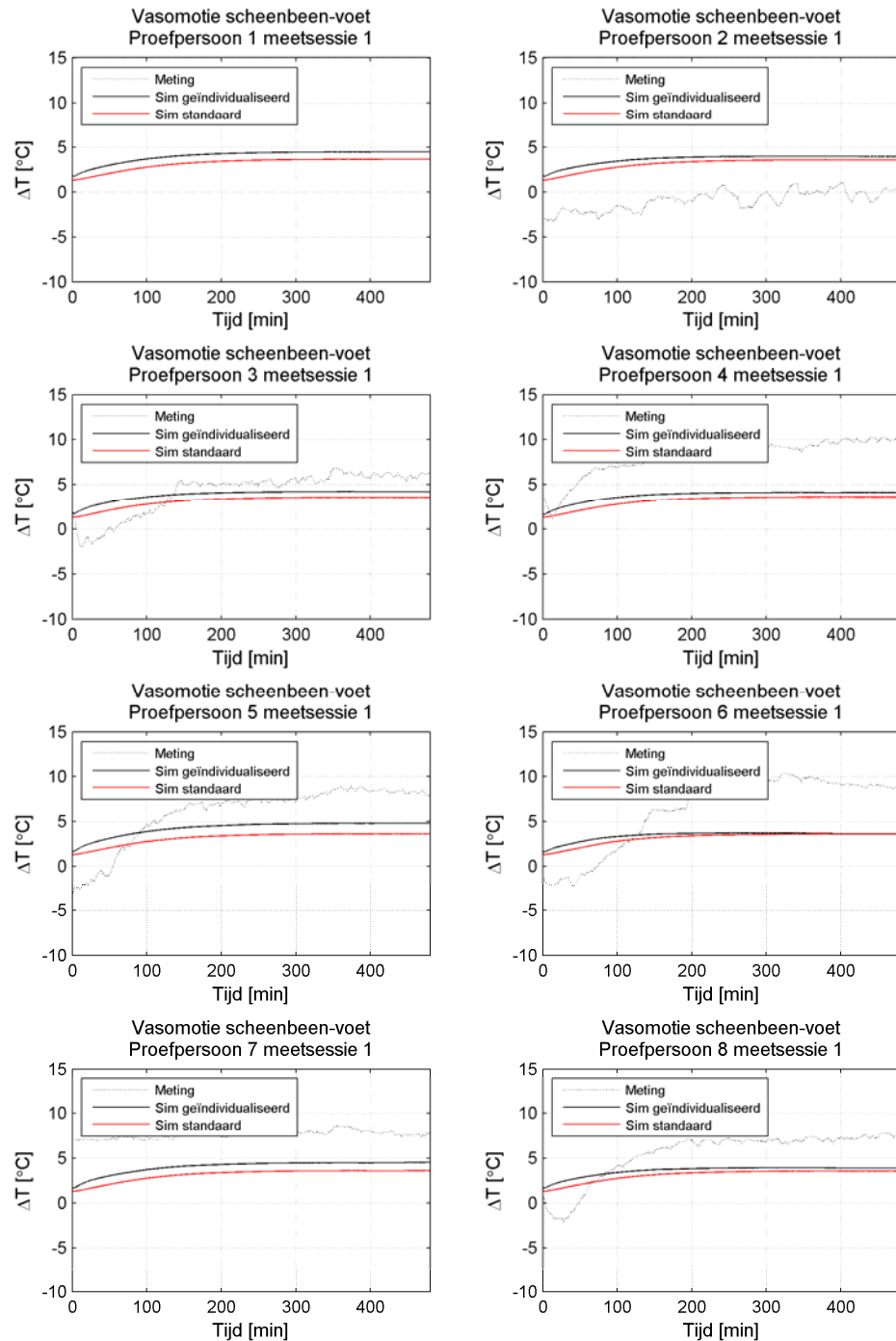


Figuur A.66: Gesimuleerde vasomotie onderarm-vingertop meet sessie 1, $v_a=0,05$ m/s

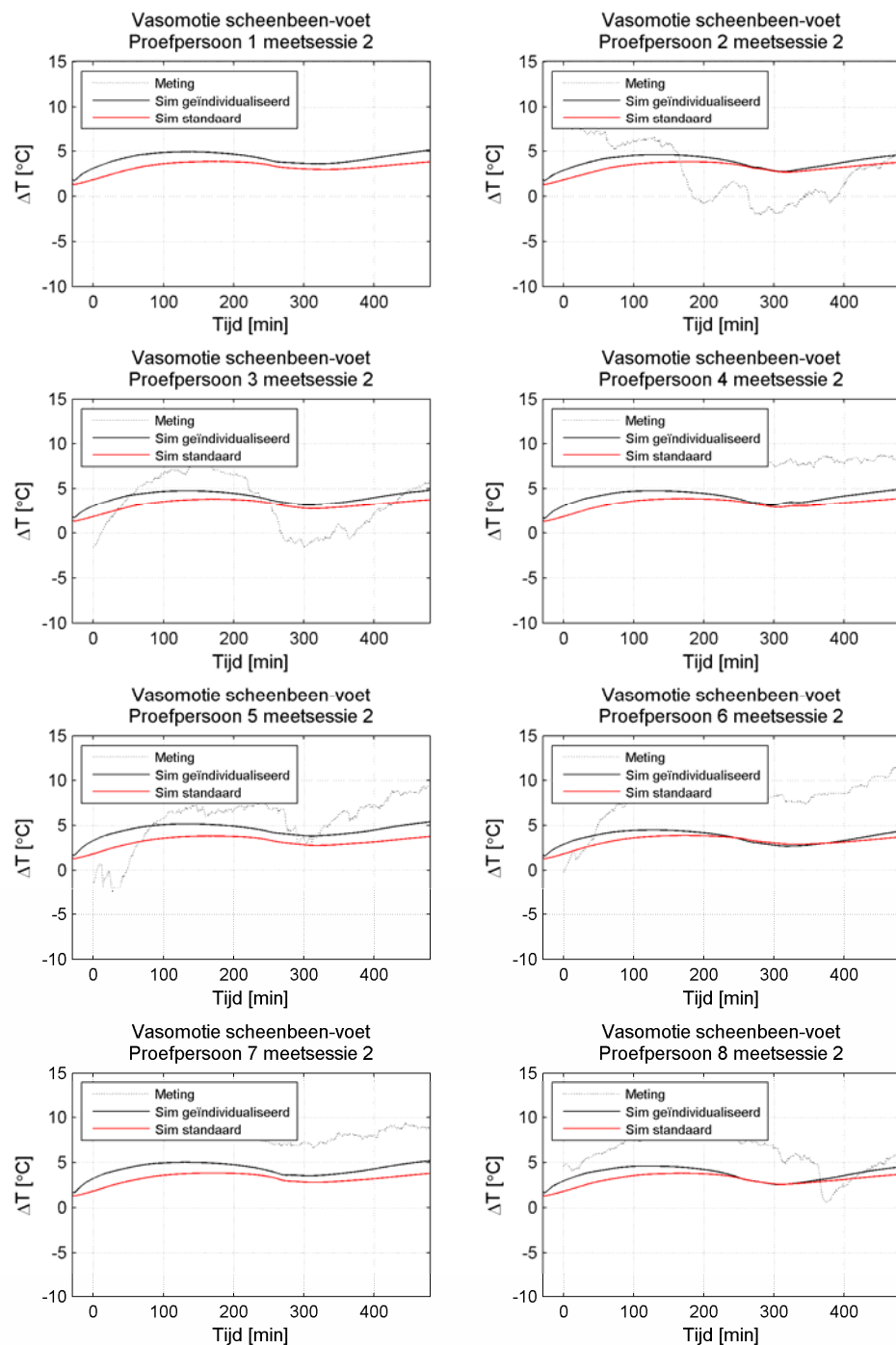


Figuur A.67: Gesimuleerde vasomotie onderarm-vingertop meet sessie 2, $v_a=0,05$ m/s

12.5 Gesimuleerde vasomotie scheenbeen-teentop

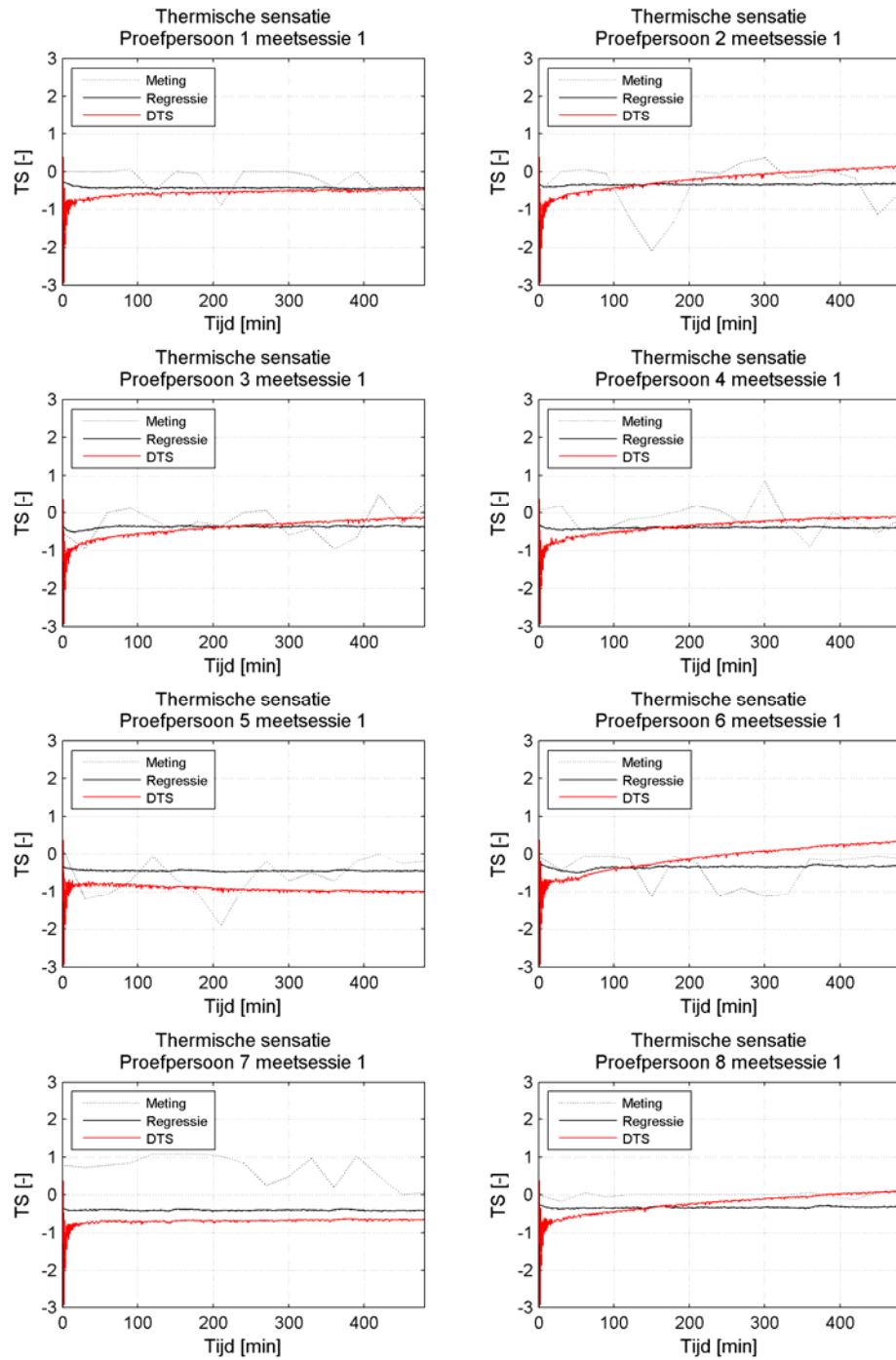


Figuur A.68: Gesimuleerde vasomotie scheenbeen-teentop meet sessie 1, $v_a=0,05$ m/s

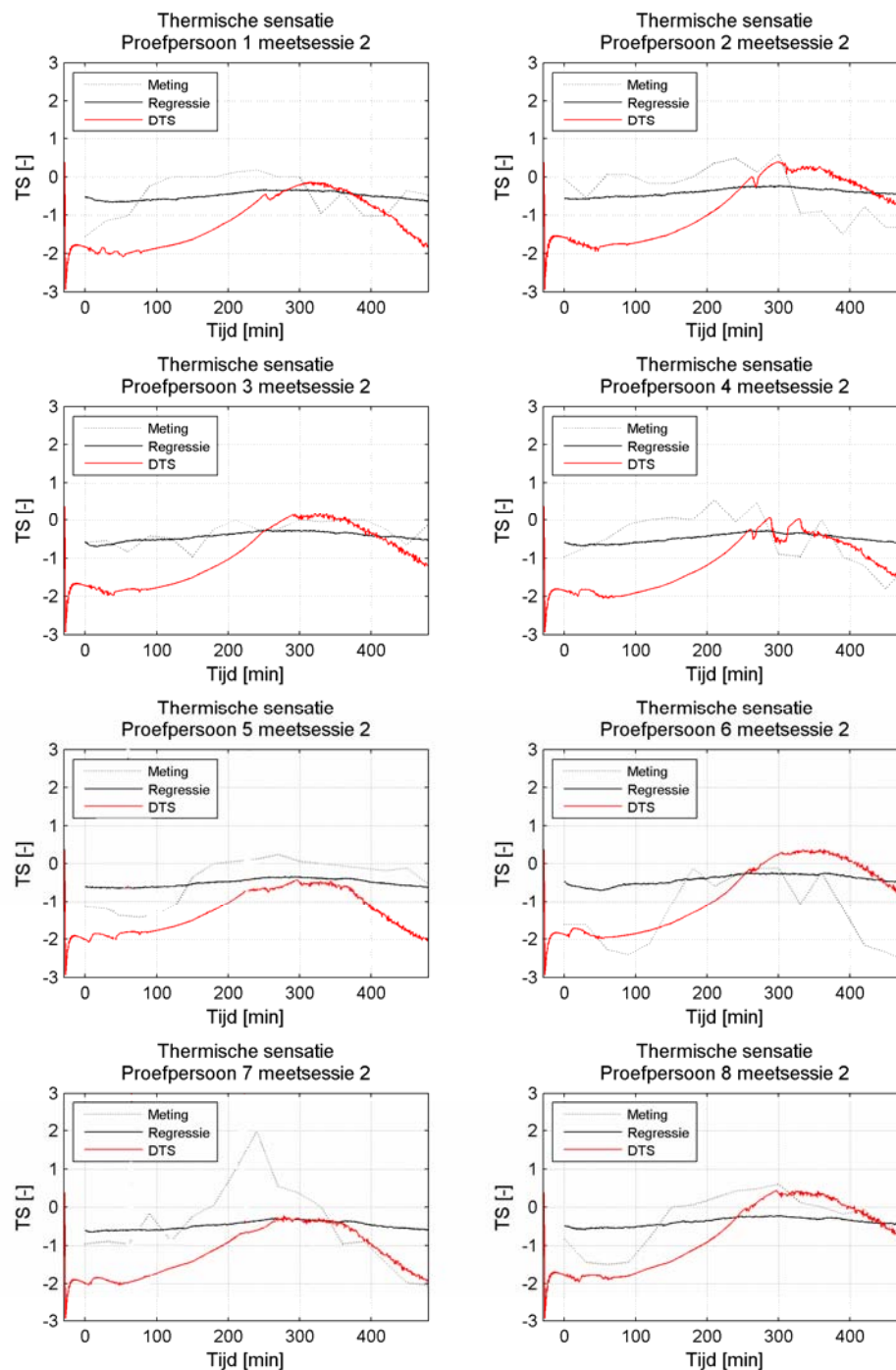


Figuur A.69: Gesimuleerde vasomotie scheenbeen-teen top meet sessie 2, $v_a=0,05$ m/s

12.6 Gesimuleerde Dynamische Thermische sensatie



Figuur A.70: Gesimuleerde Dynamische Thermische Sensatie meetsessie 1, $v_a=0,05$ m/s



Figuur A.71: Gesimuleerde Dynamische Thermische Sensatie meet sessie 2, $v_a=0,05$ m/s