

## Thermische comfortmodellen : van statisch naar dynamisch en van groep naar individu

**Citation for published version (APA):**

Frijns, A. J. H., & Marken Lichtenbelt, van, W. (2004). Thermische comfortmodellen : van statisch naar dynamisch en van groep naar individu. *TVVL Magazine*, 33(5), 16-20.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/2004

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**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
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

## Van statisch naar dynamisch en van groep naar individu

# Thermische comfortmodellen

*Tijdens de TVVL-exkursie naar Laboratorium voor Energie Technologie van TU Eindhoven is onder andere het onderzoek gepresenteerd naar een dynamisch model voor het berekenen van thermisch comfort. Dit onderzoek is gericht op individuele comfortbeleving met o.a. toepassingen in de gezondheidszorg (intensive care units), in extreme omgevingscondities (bijv. brandbestrijding), en voor kleine, individuele werkruimtes.*

*In de bouwwereld wordt veel gebruik gemaakt van het statische model van Fanger [1]. Dit model is echter minder geschikt voor individueel comfort in een dynamische omgeving. Daarom wordt een gedetailleerder dynamisch model gebruikt, dat is ontwikkeld door Fiala et al. [3,4,5]. Dit model is verder verfijnd om individuele karakteristieken van de proefpersonen mee te nemen. Aan de hand van experimenten aan proefpersonen in klimaatkamers wordt aangetoond dat dit aangepaste model goed in staat is om lokale huidtemperaturen bij individuele personen te voorspellen.*

*-door dr.in. A.J.H. Frijs\* en dr. W.D. van Marken Lichtenbelt\*\**

Sinds de eindjaren '60 en beginjaren '70 worden (computer)-modellen gebruikt om het comfort van gebruikers van gebouwen met klimaatinstallaties te voorspellen. Dit comfort wordt bepaald door de energie die door een persoon wordt opgewekt en de energie die door convection, straling, geleiding en vochtverlies aan de omgeving wordt afgestaan. Deze warmtestromen worden gebruikt in thermische comfortmodellen.

Het meest gebruikte model is het model van Fanger [1], waarin de omgevingscondities zoals de temperatuur, luchtvochtigheid en luchtsnelheid, worden gekoppeld aan de comfortbeleving van de gebruiker. In het model wordt uitgegaan van een gemiddeld mens. De

thermische sensatie wordt gekoppeld aan de thermische belasting  $L$ :

$$L = M - W - E_d - E_{sw} - E_{re} - R - C.$$

In deze vergelijking wordt gekeken naar de netto warmteproductie (het verschil tussen het metabolisme ( $M$ ) en de verrichte arbeid ( $W$ )), het warmteverlies door verdamping (diffusie door de huid ( $E_d$ ), zweeten ( $E_{sw}$ ) en ademhaling ( $E_{re}$ )), het warmteverlies door straling ( $R$ ) en het warmteverlies door convection ( $C$ ). Een persoon voelt zich comfortabel als de thermische belasting  $L$  minimaal is. Via een groot aantal experimenten met proefpersonen in klimaatkamers, heeft Fanger de thermische belasting gekoppeld aan een 'Predicted Mean Vote' (PMV) volgens de thermische sensatieschaal van ASHRAE [2]. Deze schaal verloopt van

-3 (koud) tot +3 (heet). Deze PMV-waarden kunnen worden gekoppeld aan het aantal mensen in een ruimte dat ontevreden is (PPD, 'Predicted Percentage of Dissatisfied'). Vanwege individuele fysiologische verschillen tussen mensen is deze PPD altijd groter dan 5%.

In de publicatie "Thermal comfort" [1] neemt Fanger aan dat er geen substantieel verschil bestaat tussen mannen en vrouwen. Uit een analyse van de metingen lijkt er echter wel een verschil te bestaan tussen mannen en vrouwen. Op eenzelfde manier als die van Fanger, wordt een lijn door de experimentele gegevens gefit. Er wordt nu echter wel onderscheid gemaakt tussen gegevens van mannen en die van vrouwen. Dit leidt tot een comfortzone ( $-0.5 < PMV < 0.5$ ) die ongeveer  $1^\circ\text{C}$  verschilt voor mannen ten opzichte van de zone voor vrouwen (figuur 1).

In het model van Fanger worden tevens de lichaamsreacties (bijv. vasoconstrictie of vasodilatatie) op veranderingen in de omgeving niet meegenomen, waardoor ook op deze manier een (positieve) beïnvloeding van de comfortzone en de dynamische effecten worden verwaarloosd.

Dit leidt tot de conclusie dat het model van Fanger weliswaar geschikt is voor grote gemengde groepen mensen in gematigde en 'steady-state' omgevingscondities, maar dat er voor kleinere groepen mensen en/of voor snel veranderende omgevingscondities, een

\* Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Werktuigbouwkunde

\*\* Universiteit Maastricht, vakgroep Humane Biologie

gedetailleerder model moet worden gebruikt. Zeker in situaties waar dit belangrijk is, zoals in de gezondheidszorg (intensive care units, brandwondencentra, openhartoperaties, enz.), in extreme omgevingscondities (brandbestrijding, ruimtevaart, diepzee, enz.) en in kleine, individuele werkplekken (vrachtwagencabine, enz.).

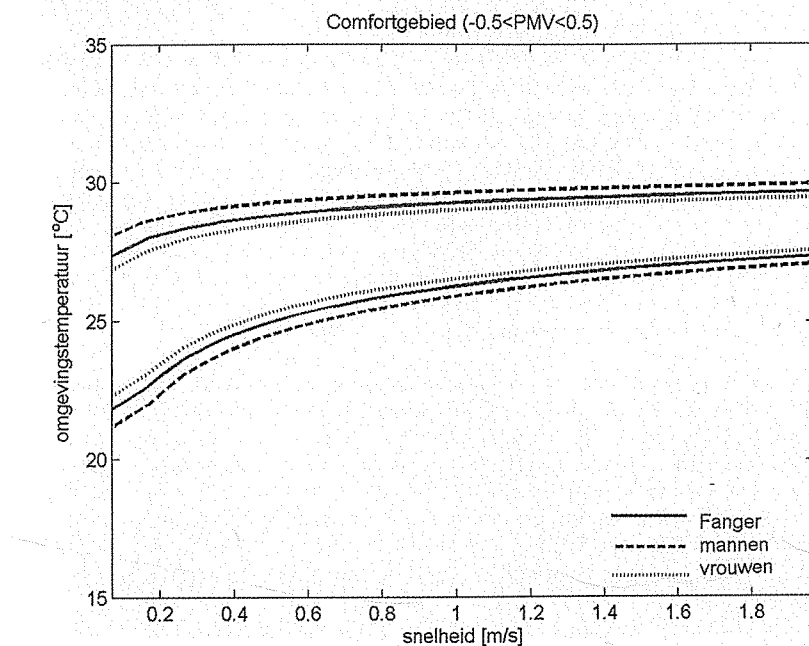
Binnen de onderzoeksgroep wordt een gedetailleerder dynamisch model gebruikt, dat door Fiala et al. [3,4] is ontwikkeld en door de onderzoeksgroep verder wordt uitgebreid.

### DYNAMISCH MODEL

Dynamische modellen zijn al in de jaren '70 ontwikkeld. Hierbij wordt het lichaam in een aantal segmenten verdeeld, die door een centraal bloedcompartiment met elkaar zijn verbonden. Door convectie in dit compartiment vindt het warmtetransport van het ene naar het andere segment plaats.

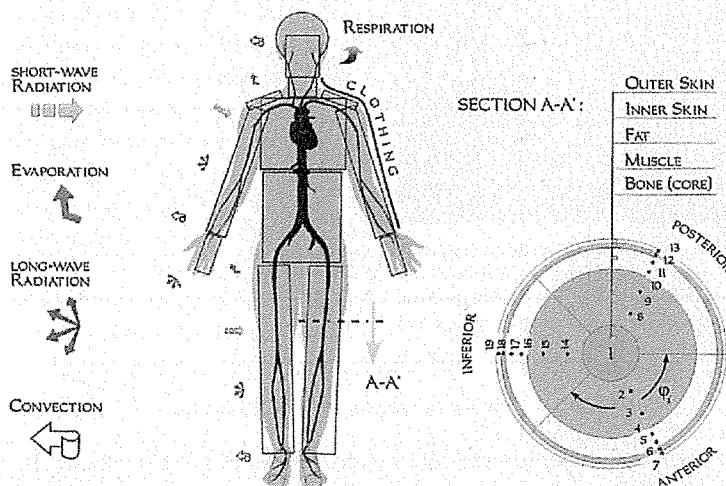
De meeste van deze modellen zijn gebaseerd op het model van Stolwijk [7], die het lichaam modelleerde door een bol voor het hoofd en cilinders voor de armen, benen en de romp te nemen. Ieder element bestaat uit vier concentrische lagen, die de verschillende weefsels representeren. Een warmtebalansvergelijking beschrijft de geleiding door de weefsellagen, het eventuele metabolisme in het weefsel en het convectief warmtetransport door het centrale bloedcompartiment. De warmte-uitwisseling met de omgeving wordt beschreven door middel van randvoorwaarden aan de buitenste weefsellag.

In de jaren '90 hebben Fiala et al. [3,4,5] dit model uitgebreid. In hun model wordt het lichaam verdeeld in 14 cilinders en een combinatie van een bol en een cilinder voor het hoofd (figuur 2). Iedere cilinder of bol bestaat uit een vijftal lagen, waarmee de verschillende weefsellagen worden gemodelleerd. De warmte wordt door het lichaam verspreid door de kernsegmenten. Fiala deelt de cilinders nog verder op in een drietal gebieden: anterior (de voorkant), inferior (de lichaamszijde) en posterior (de achterkant) (figuur 2). Hierdoor kan de invloed van bijv. een stoel of een bed of de invloed van een lokale warmte-



Comfortgebied (-0.5 < PMV < 0.5) voor mannen en voor vrouwen, gebaseerd op de gegevens van Fanger [1].

FIGUUR 1-



Schematische weergave van het model van Fiala et al. [3].

FIGUUR 2-

bron in de omgeving worden bestudeerd. Fiala gaat uit van een gemiddelde man (73.5kg, 14 % vet, een lichaamsoppervlak van 1.9 m<sup>2</sup> en een basale stofwisseling van 87 W).

Het model bestaat uit een passief en een actief gedeelte. Het passieve gedeelte beschrijft de temperatuurverdeling in het lichaam zonder dat het lichaam actief reageert op de omgeving en/of temperatuurveranderingen in het lichaam. Door stofwisselingsprocessen wordt warmte geproduceerd, die door de bloedstroom en geleiding over het lichaam wordt verdeeld. Dit wordt

beschreven door de biowarmte-vergelijking van Pennes [6]

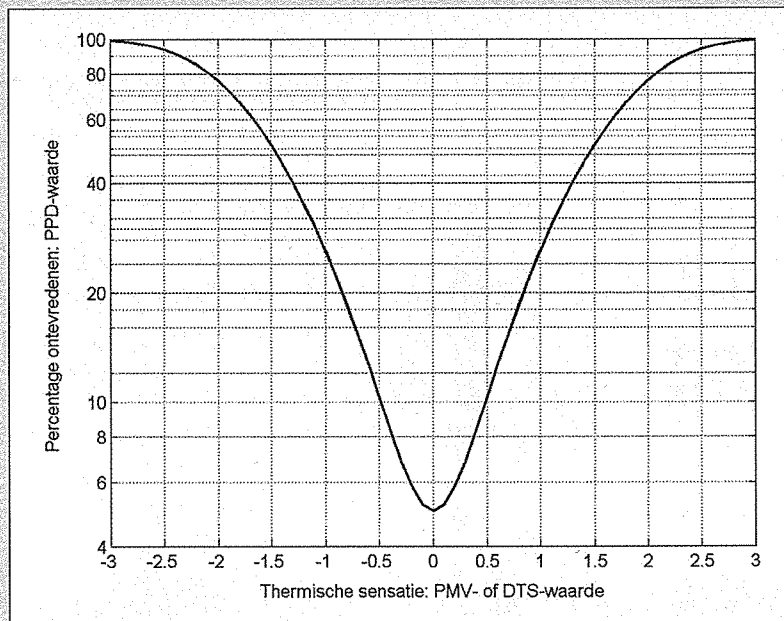
$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\omega}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \rho_{bl} w_{bl} c_{bl} (T_{bl} - T) + q_m$$

oftewel "warmteopslag in het weefsel = geleiding + convectie + stofwisseling". In deze vergelijking is  $\rho$  de dichtheid,  $c$  de specifieke warmtecoëfficiënt,  $k$  de geleidingscoëfficiënt,  $T$  de temperatuur,  $\omega$  een vormfactor (1 voor een cilinder en 2 voor een bol) en  $q_m$  is de warmte die door de stofwisseling wordt geproduceerd. Het onderschrift <sub>bl</sub> geeft aan dat het te maken heeft met het bloed.

## THERMISCHE SENSATIE EN THERMISCH COMFORT

De begrippen thermische sensatie en thermisch comfort zijn verwante termen, maar niet dezelfde. Thermische sensatie geeft het gevoel van een persoon weer, dat voornamelijk door de huidtemperatuur wordt bepaald. Deze sensatie wordt vaak op een zevenpuntsschaal uitgedrukt. Meestal de ASHRAE-schaal, die loopt van -3 (koud) tot +3 (heet). Proefpersonen geven een beoordeling op deze schaal, maar deze waarde kan ook met verschillende modellen worden berekend. Zo berekent het model van Fanger een PMV-waarde ('Predicted Mean Vote'). Deze waarde is de gemiddelde waarde voor een grote groep personen bij constante omgevingscondities. Het model van Fiala berekent een DTS-waarde ('Dynamic Thermal Sensation') voor een omgeving, waarin de condities sterk mogen variëren.

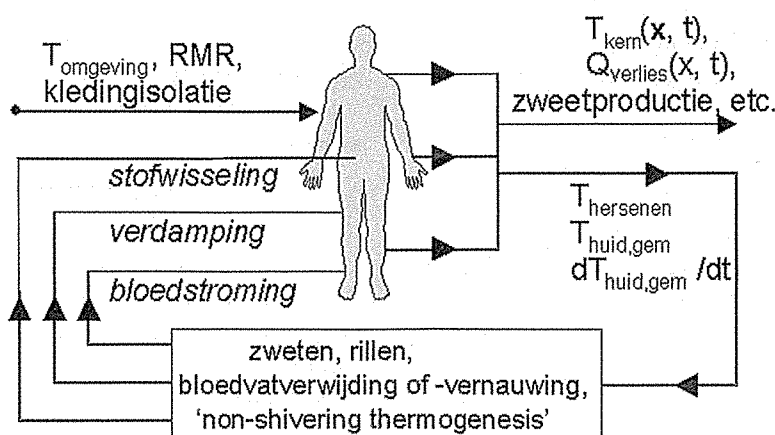
Thermisch comfort geeft aan of een persoon de omgeving behaaglijk of onbehaaglijk vindt. Dit kan aan de thermische sensatie worden gekoppeld door de PPD-waarde (Predicted Percentage of Dissatisfied). Deze PPD-waarde is een maat voor het percentage mensen dat ontevreden is over de omgevingscondities. Deze koppeling gebeurt voor zowel de PMV- waarde als voor de DTS-waarde op dezelfde manier (figuur A). Vaak wordt als criterium genomen dat een omgeving comfortabel is als het percentage ontevredenen kleiner dan 10% is. Dit komt overeen met een PMV- of een DTS-waarde tussen -0,5 en +0,5. Door fysiologische verschillen tussen mensen komt de PPD-waarde niet onder 5%.



Percentage ontevredenen als functie van de thermische sensatie volgens de ASHRAE-schaal.

-FIGUUR A-

KADER 1-



Schematische weergave van het actieve regelmechanisme.

-FIGUUR 3-

De biowarmte-vergelijking beschrijft de temperatuurverdeling in het lichaam. Via randvoorwaarden voor de convectie, verdamping, de straling en de geleiding, wordt de warmte-uitwisseling met de omgeving gemodelleerd.

Naast dit passieve deel is er nog een actief deel. Dit deel beschrijft de reactie van het lichaam op (veranderingen in) de omgevingscondities en/of veranderingen in de temperatuurverdeling in het lichaam (figuur 3). Het lichaam kan reageren door extra warmte te produceren (rillen, verhoogde stofwisseling), te gaan zweten, of het bloed op een andere manier over het lichaam te verdelen (lokale bloedvatverwijding of -vernauwing).

Net zoals Fanger, heeft Fiala een maat voor de thermische sensatie gedefinieerd [5]. Ook deze is gebaseerd op de ASHRAE-schaal: -3 voor koud en +3 voor heet. Deze schaal, de 'dynamic thermal sensation' (DTS), is een dynamische grootte, omdat ook temperatuurveranderingen worden meegenomen. De DTS is gedefinieerd als  $DTS = 3 \tanh(f_{sk} + \Phi + \Psi)$ , waarbij  $f_{sk}$  afhankelijk is van het temperatuurverloop in de huid,  $\Phi$  afhankelijk is van het temperatuurverschil tussen de kern (hart, hersenen en andere vitale organen) en de huid en  $\Psi$  afhankelijk is van de snelheid waarmee de huidtemperatuur verandert. Het laatste deel is dus een dynamisch deel, dat belangrijk wordt op het moment dat de omgevingscondities snel veranderen: het lichaam anticipeert op deze veranderingen. De functies voor  $f_{sk}$ ,  $\Phi$  en  $\Psi$  zijn bepaald door regressie analyses toe te passen op een groot aantal experimenten aan proefpersonen. Ze zijn dus niet gebaseerd op fysiologische modellen. Uit de onderzoeken van Fiala et al. [5] blijkt deze DTS-waarde voor een gemiddelde proefpersoon goed overeen te komen met dynamische metingen in klimaatkamer (figuur 4).

## INDIVIDUEEL COMFORT

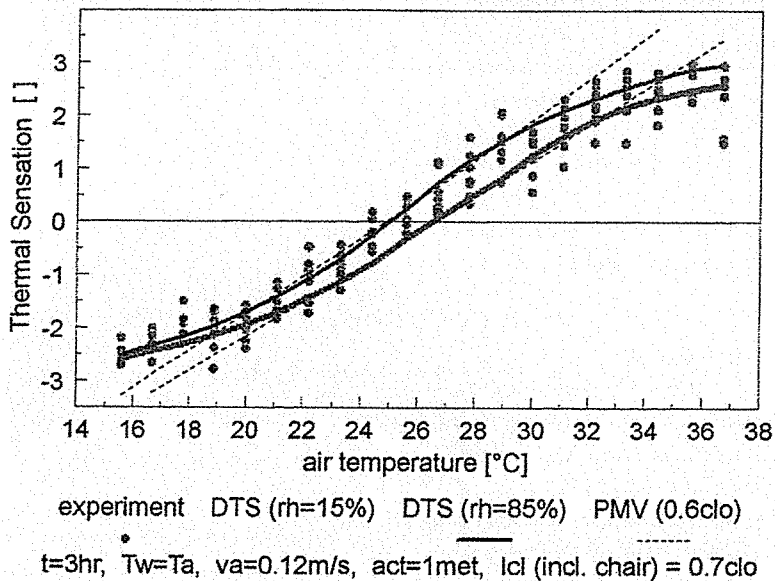
We onderzoeken in hoeverre het model van Fiala bruikbaar is voor individueel comfortbeleving. Daartoe maken we gebruik van metingen aan gezonde proefpersonen. Bij Humane Biologie in Maastricht werden metingen verricht aan 20 proefpersonen, die in een ruimte met een comfortabele omge-

vingstemperatuur van ongeveer 22 °C lagen. Na 60 minuten, werd de temperatuur snel verlaagd naar 16 °C. Gemeten werd de huidtemperatuur op diverse plaatsen, de kerntemperatuur in de darmen met behulp van temperatuurtelemetrie en het energiegebruik (warmteproductie) met behulp van indirecte calorimetrie. Bij indirecte calorimetrie wordt het zuurstofgebruik en de kooldioxideproductie gemeten met behulp van een 'ventilated hood' (figuur 5). Uit deze gaswisseling wordt het energiegebruik berekend.

De gemeten (huid)temperaturen zijn vergeleken met de berekende waarden uit het model van Fiala. Als voorbeeld bekijken we de resultaten voor een been. De andere plaatsen op het lichaam geven soortgelijke resultaten. In eerste instantie worden de individuele metingen vergeleken met de voorspellingen van het model voor een gemiddelde persoon. In figuur 6 staat het gemiddelde temperatuurverschil en de standaarddeviatie tussen het model en de metingen van alle proefpersonen.

Het blijkt dat het verschil tussen het model en de metingen gemiddeld 1,0 °C (in 'steady-state') tot 2,5 °C (na de temperatuurverandering) bedraagt. Dit wordt veroorzaakt doordat er onvolledige rekening wordt gehouden met de individuele ruststofwisseling en de lichaamssamenstelling (lengte, gewicht,

vetpercentage). Als de afmetingen van de cilinders en de dikte van de afzonderlijke lagen met deze gegevens worden aangepast en de individuele ruststofwisseling wordt meegenomen, blijkt dat de verschillen tussen het model en de metingen worden teruggebracht tot minder dan 0,5 °C (figuur 7). Deze eerste resultaten geven aan dat het dynamische model van Fiala bruikbaar is voor individuele personen mits er wordt gecorrigeerd voor individuele karakteristieken. Uiteraard is er



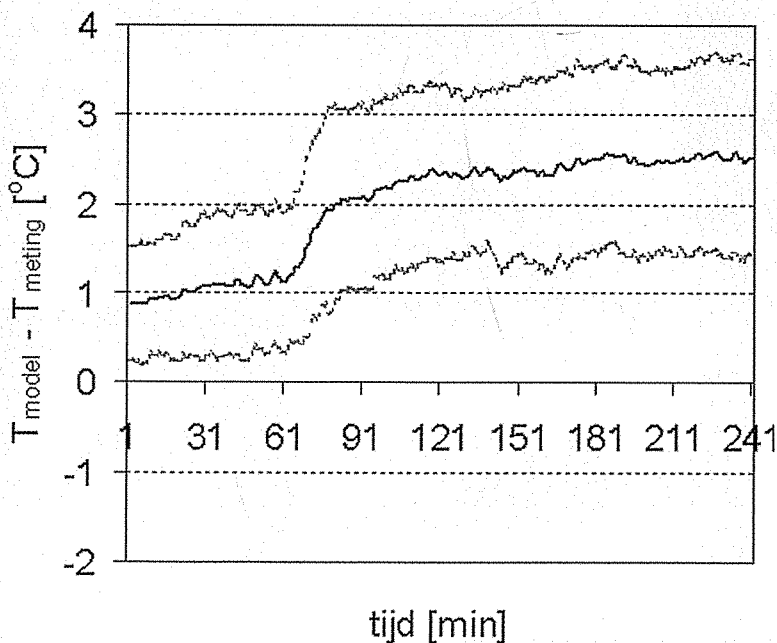
Dynamische (DTS) en statische (PMV) thermische sensatie [5].

FIGUUR 4-



Proefpersoon in de klimaatkamer met een 'ventilated hood', waarmee de samenstelling van de in- en uitgeademde lucht kan worden geanalyseerd.

FIGUUR 5-




Gemiddeld verschil (zwarte lijn) met standaard deviatie (rodelijnen) tussen de berekende en gemeten temperatuur van het been.

FIGUUR 6-

nog verder onderzoek nodig, waarin meerdere plekken op het lichaam in de analyse worden meegenomen en de standaarddeviatie kan worden verkleind.

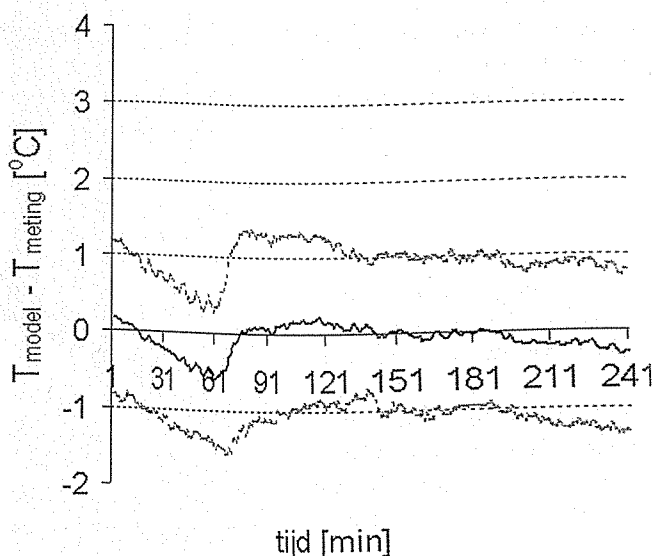
#### TOEKOMSTIG ONDERZOEK

Zoals eerder vermeld, is het model van Fiala gebaseerd op regressie-analyse. Zolang de onderzochte personen gezond zijn, levert dat goede resultaten op, mits er voor individuele karakteristieken wordt gecorrigeerd. Op het moment echter dat we het model willen gebruiken in de gezondheidszorg, bijvoorbeeld voor intensive care units of brandwondencentra, hebben we te maken met zieke personen. In deze gevallen kan het zijn dat de stofwisseling (lokaal) is verstoord. Zeker als er ook nog gebruik wordt gemaakt van anesthesie. De regressie-modellen

moeten in dat geval worden vervangen door modellen met een fysiologische achtergrond. Hierdoor kunnen deze verstoringen op een juiste manier worden meegenomen. Het doel van het toekomstig onderzoek is daarom om naast de correctie voor de individuele karakteristieken, ook de fysiologische regelmechanismen te integreren in het model van Fiala. 

#### LITERATUURLIJST

1. Fanger, P.O., *Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering*, McGraw-Hill Book Company, 1972
2. *ASHRAE Handbook: Fundamentals, SI Edition*, editor R.A. Persons, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., 1989.
3. Fiala, D., Lomas, K.J. en Stohrer, M. *Modeling in physiology, A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system*, The American Physiological Society, p. 1957-1972, 1999.
4. Fiala, D., Lomas, K.J. en Stohrer, M., *Computer prediction of human*



Gemiddeld verschil (zwarte lijn) met standaarddeviatie (rode lijnen) tussen de berekende en gemeten temperatuur van het been. Gecorrigeerd voor ruststofwisseling en lichaamssamenstelling.

-FIGUUR 7.

thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions, *Int. J. Biometeorology*, 45, p. 143-159, 2001.

5. Fiala, D., Lomas, K.J. en Stohrer, M., *First principles modelling of thermal sensation responses in steady-state and transient conditions*, *ASHRAE Trans-*

actions, 109, p. 179-186, 2003.

6. Pennes, H., *Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm*, *Journal of Applied Physiology*, p. 93-122, 1948.

7. Stolwijk, J.A.J., *A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man*, NASA, 1971

## DUURZAME WEBSITE

De site van Stiebel Eltron is vernieuwd: [www.stiebel-eltron.nl](http://www.stiebel-eltron.nl). Het bedrijf is leverancier van duurzame systemen voor warmwaterbereiding en verwarming en levert warmtepompsystemen voor verwarming en warmtepompboilers voor warmwaterbereiding uit ventilatielucht.



## DUURZAME ENERGIE-PLANNER OP INTERNET

Novem biedt de bouwsector digitale kennis aan over Duurzame Energie. De website [www.DEplanner.novem.nl](http://www.DEplanner.novem.nl) geeft praktische informatie en wijst de weg naar effectieve duurzame energietechnieken. Met de recente uitbreiding is de 'DEplanner' nu ook voor woningbouwcorporaties en toepassingen in de bestaande woningbouw een handig hulpmiddel. Begin 2004 is de digitale Duurzame Energieplanner bijgewerkt en uitgebreid met informatie voor

woningcorporaties, informatie en links voor renovatieprojecten en mogelijkheden van Duurzame Energietoepassingen in bestaande woningbouw. De DEplanner bestaat uit meer dan 250 webpagina's en vermeldt ruim 150 bronnen. Het aantal voorbeelden is inmiddels opgelopen tot ruim 100. Het afgelopen jaar is de DEplanner op internet zo'n 400 keer per maand geraadpleegd.

Informatie: Novem  
Tel. 046 4202202

## Berichten

### TIPS DUURZAAM BOUWEN

Er is een rijklijk geïllustreerd boekje verschenen met vijftig tips over duurzaam bouwen voor bouwprofessionals en consumenten die gaan (ver)bouwen. Per thema wordt een serie tips gegeven die een gezonde, milieuvriendelijke en kostenbesparende woning garanderen. De thema's die aan bod komen zijn: de initiatief- en ontwerpfasen,

gezondheid, ruimte en omgeving, materialen, energie en water. Het boekje kost € 9,50 exclusief 6% BTW en verzendkosten en is te bestellen bij het Nationaal Dubo Centrum, per e-mail [verkoop@dubo-centrum.nl](mailto:verkoop@dubo-centrum.nl).

Informatie: Nationaal Dubo Centrum  
Tel. 010 4124766

### BEZORGSERVICE VOOR BOUW

Bouwmaat, [www.bouwmaat.nl](http://www.bouwmaat.nl), is een magazijn voor professionals werkzaam in bouw, renovatie en onderhoud. Meer dan 10.000 professionele artikelen zijn onder één dak met 100% voorraadgarantie af te halen. Soms komt het echter voor dat afhalen de

klant niet goed uitkomt. Bijvoorbeeld als hij voor een project extra veel volume inkoop. Bouwmaat introduceert hiervoor een landelijke uniforme bezorgservice met vaste tarieven binnen vastgestelde zones.