Nederlandse organisatie
voor toegepast
natuurwetenschappelijk
onderzoek

IZF

Instituut voor
Zintuigfysiologie TNO

89-4561

(1)

IZF 1990 B-2

WARMTETRANSPORT IN KLEDING BIJ AANSTRALING MET WARMTE

A.M.J. Pieters
W.A. Lotens

13

TDCK
Rijnsburg
Fredericq
Postbus

DTIC FILE COPY

AD-A226 089

DTIC
ELECTE
AUG 20 1990
S D
D

DISTRIBUTION STATEMENT A
Approved for public release;
Distribution Unlimited

20030210050

90 08 16 095

Best Available Copy

Nederlandse organisatie
voor toegepast
natuurwetenschappelijk
onderzoek

TNO-rapport

Instituut voor
Zintuigfysiologie TNO

Postbus 23
3769 ZG Soesterberg
Kampweg 5
3769 DE Soesterberg

Telefax 03463 - 5 39 77
Telefoon 03463 - 5 62 11

(1)

IZF 1990 B-2

WARMTETRANSPORT IN KLEDING BIJ AANSTRALING MET WARMTE

13

A.M.J. Pieters
W.A. Lotens

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO. Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de 'Algemene Voorwaarden voor Onderzoeksopdrachten TNO', dan wel de betreffende terzake tussen partijen gesloten overeenkomst.

© TNO

DTIC
ELECTE
AUG 2 0 1990
S D
D

DISTRIBUTION STATEMENT A
Approved for public release;
Distribution Unlimited

Aantal bladzijden: 60

INHOUD

		Blz.
SAMENVATTING		5
ABSTRACT		6
1	INLEIDING	7
2	THEORIE EN ACHTERGRONDEN VAN HET STRALINGSMODEL	8
2.1	Inleiding	8
2.1.1	Conductie	9
2.1.2	Convectie	9
2.1.3	Radiatie	10
2.1.4	Evaporatie	12
2.2	Warmtetransport in kleding	13
2.2.1	Model voor droge warmte-afgifte	14
2.2.2	Model voor evaporatie	18
2.2.3	Het computermodel	20
3	MODEL VOOR BEREKENING VAN TEMPERATUREN BIJ AANSTRALING VAN EEN DOEK	21
3.1	Straling op doek	21
3.2	Het meten van doektemperaturen	23
3.2.1	Inleiding	23
3.3	Materiaal en methode	23
3.4	Resultaten	24
3.5	Discussie	26
4	DE INVLOED VAN STRALING, WIND EN BEWEGING OP KLEDING-TEMPEATUUR EN ISOLATIE	27
4.1	Inleiding	27
4.2	Materiaal en methode	27
4.2.1	Proefpersonen	27
4.2.2	Proefopstelling	28
4.2.3	Proefopzet	29
4.2.4	Formules	29
4.3	Resultaten	32
4.3.1	Metabolisme	32
4.3.2	Temperaturen in de niet-zon-conditie	32
4.3.3	Temperaturen in de zon-conditie	34
4.3.4	Warmte-overdrachtscoëfficiënten	37
4.3.5	Gemeten versus berekende temperaturen	38
4.4	Discussie	39

5	DE INVLOED VAN REFLECTIE, TRANSMISSIE EN ABSORPTIE OP KLEDINGTEMPERATUUR EN ISOLATIE	41
5.1	Inleiding	41
5.2	Materiaal en methode	41
5.2.1	Proefpersonen	41
5.2.2	Proefopstelling	42
5.2.3	Proefopzet	42
5.3	Resultaten	42
5.3.1	Metabolisme	42
5.3.2	Temperaturen in de niet-zon-conditie	43
5.3.3	Temperaturen in de zon-conditie	43
5.3.4	Warmte-overdrachtscoëfficiënten	44
5.3.5	Gemeten versus berekende temperaturen	45
5.4	Discussie	46
6	VENTILATIE	47
6.1	Theorie en achtergronden van de ventilatie-metingen	47
6.2	Experimentele bepaling van de ventilatie	51
6.2.1	Inleiding	51
6.3	Materiaal en methode	51
6.4	Resultaten	52
6.5	Discussie	53
7	DISCUSSIE	53
REFERENTIES		56
APPENDIX I: Oplossing vergelijkingen blz. 17		58
APPENDIX II: Warmtebalansgegevens		59

Accession For
NTIS GRA&I
DTIC TAB
Unannounced
Justification
By
Distribution/
Availability Codes
Dist Avail and/or Special
A-1

QUALITY INSPECTED 4

Rapport nr.: IZF 1990 B-2

Titel: Warmtetransport in kleding bij aanstraling met warmte

Auteurs: Mw. A.M.J. Pieters en drs. W.A. Lotens

Instituut: Instituut voor Zintuigfysiologie TNO

Datum: januari 1990

HDO Opdrachtnummer: B88-60

Nummer in MLTP: 736.1

SAMENVATTING

Een model is opgesteld om de temperaturen en warmtestromen in kleding te bepalen bij eenzijdige aanstraling met warmte. Het model gaat uit van twee lagen kleding en berekent de temperatuur van beide kledinglagen en de ingesloten luchtlaag plus de warmtestromen die van huid en kleding afkomstig zijn. Het model is experimenteel geverifieerd. In de beschreven experimenten wordt alleen de droge warmte stroom bepaald. Dit is mogelijk door de proefpersonen in plastic te wikkelen. In het eerste experiment is de invloed van straling, wind en beweging op kledingtemperatuur en isolatie bepaald. De proefpersonen stonden, stonden in wind (1 m/s) en liepen (4 km/uur) bij een stralingsintensiteit van 550 W/m^2. Wind en beweging zorgen voor een verlaging van de paktemperatuur en isolatie. Wind beïnvloedt met name de isolatie van de aanhangende luchtlaag, terwijl beweging meer van invloed is op de pakisolatie. Vergelijking van het stralingsmodel met de gemeten waarden vertonen grote overeenkomst. Het verschil tussen de gemeten en berekende temperatuur bedraagt gemiddeld 0.4°C (SD = 1.9). De droge warmtestroom van de huid verschilt gemiddeld 0 W/m^2 (SD = 13).
In een tweede experiment is de invloed van absorptie-, reflectie- en transmissie-eigenschappen van kleding bepaald. De proefpersonen droegen een absorberend, reflecterend en transmitterend pak tijdens lopen met een snelheid van 4 km/uur bij 800 W/m^2. De gemeten huidtemperatuur bij het reflecterende pak ligt 5°C lager dan bij het absorberende en transmitterende pak. De gemeten temperaturen en warmtestroom komen goed overeen met de door het model berekende temperaturen. Gemiddeld bedraagt het temperatuursverschil 1.2°C (SD = 1.4), en het verschil in warmtestroom 2.2 W (SD = 8.6).

Rep.No. IZF 1990 B-2

TNO Institute for Perception,
Soesterberg, The Netherlands

Heat transport in clothing during irradiation with heat

A.M.J. Pieters and W.A. Lotens

ABSTRACT

A model is suggested to calculate temperatures and heatflows in clothing with one-sided heat radiation. Two clothing layers are taken into account in the model. The model is verified experimentally. In these experiments only the dry heatflow is measured by wrapping the subjects in plastic foil. In the first experiment the influence of radiation (550 W/m^2), wind (1 m/s) and movement (standing or walking 4 km/h) were studied. Wind and movement decrease clothing temperature and insulation. The insulation of the air is mainly influenced by wind whereas the clothing isolation is mainly influenced by movement. The mean difference between the measured and calculated temperatures is 0.4°C (SD = 1.9) and between heatflow 0 W (SD = 13).
In a second experiment the influence of the radiation properties of clothing was determined. The subjects wore absorbing, reflecting, and transmitting garments while walking at a speed of 4 km/h in radiation of 800 W/m^2. In the reflecting garment, the mean skin temperature was 5°C lower than in the absorbing or transmitting garment. The mean difference between measured temperatures and calculated temperatures is 1.2°C (SD = 1.4), and between the heatflows 2.2 W (SD = 8.6).

1 INLEIDING

Het effect van warmtestraling op de warmtewisseling tussen mens en omgeving is een zeer complex geheel. In 1968 beschreven Roller en Goldman een model voor de berekening van de warmtebelasting van de zon op de mens. De voorspelde belasting was echter veel hoger dan de gemeten belasting aan de naakte mens door Gosselin (1947), Henschel en Hanson (1960) en Breckenridge en Pratt (1961). Na modificatie van het model door Breckenridge en Goldman (1971, 1972) bedroeg het verschil tussen gemeten en berekende gemiddelde belasting slechts 4 W (SD = 7.6).
Nielsen e.a. (1988) bepaalden de warmtebelasting bij straling tijdens fietsen voor 10 mannen, gekleed in shorts en Nielsen (1989) voor 3 vrouwen en 3 mannen die afwisselend zwarte en witte kleding droegen. De fysiologische belasting in zwarte kleding is hoger dan in witte kleding.
In de literatuur is weinig bekend over het warmtetransport in aangestraalde kleding. Vele studies betreffen warmtebelasting en comfort van de mens (McIntyre, 1976; Olesen e.a., 1972) bij aanstraling, zonder in te gaan op hetgeen in de kleding gebeurt. Cena en Clark (1974) beschreven een fysisch model voor de warmtebalans in de vachten van dieren. Hierbij wordt de vacht als één homogene laag beschouwd. Vergelijking van warmtestromen door kleding bij verschillende stralingsintensiteiten (Clark en Cena, 1978) blijken goed overeen te komen met dit model. Het model geeft echter geen inzicht in hetgeen gebeurt indien er wind of beweging aanwezig is en wat de invloeden van de verschillende kledingsoorten zijn.
Het in deze studie beschreven model beschrijft een twee-lagig kledingmodel. Het berekent de temperaturen van beide kledinglagen en het microklimaat, plus de warmtestromen die van huid en kleding afkomstig zijn. Het model is gebaseerd op een netwerk. De isolaties van de kledinglagen komen overeen met weerstanden en de drijvende kracht wordt gerepresenteerd door de temperatuurverschillen over de kledinglagen.
Voor verificatie van het model zijn twee experimenten uitgevoerd. Ten eerste een experiment waarbij één kledingconfiguratie is gedragen en de invloed van wind en beweging is bepaald (Par. 3). Het tweede experiment bestaat uit het bemeten van drie kledingconfiguraties, waarbij de invloed van transmitterende, absorberende en reflecterende kledingeigenschappen onderzocht is (Par. 4).
Voor het berekenen van de kledingtemperaturen en warmtestromen door het model dienen een aantal parameters ingevoerd te worden, betreffende de kledingeigenschappen en omgevingscondities. Eén van deze parame-

ters is de ventilatie van de kleding. Met behulp van de tracergasmethode, beschreven door Lotens en Havenith (1988), is de ventilatie van de drie kledingconfiguraties bepaald (Par. 5).
Naast het kledingmodel is een model opgezet voor de berekening van de warmtewisseling van een doek dat aangestraald wordt met een bepaalde stralingsintensiteit. De theorie achter het model voor aanstraling van een doek is eenvoudiger dan van het kledingmodel. Het experiment betreffende aanstraling van een doek staat beschreven in Par. 2.

2 THEORIE EN ACHTERGRONDEN VAN HET STRALINGSMODEL

2.1 Inleiding

Tussen mens en omgeving vindt voortdurend warmte-uitwisseling plaats. De hoeveelheid warmte die een persoon verliest is in evenwichtsconditie gelijk aan zijn warmteproduktie volgens de vergelijking

$$M = R + C + D + E \qquad (1)$$

waarbij

M: metabole warmteproduktie	[W/m²]
R: radiatie	[W/m²]
C: convectie	[W/m²]
D: conductie	[W/m²]
E: evaporatie	[W/m²]

Radiatie is de warmte-uitwisseling in de vorm van infrarode stralen met een golflengte van 5-20 micron. Deze golflengte is 10-30 maal de golflengte van zichtbaar licht en is gekoppeld aan de temperatuur van het stralende oppervlak. Convectie is gedefinieerd als het warmtetransport door stroming, bijvoorbeeld van lucht. Bij conductie betreft het warmtetransport door middel van impulsoverdracht binnen een vast lichaam of tussen twee vaste lichamen, zoals het warmtetransport in een stilstaande luchtlaag. Evaporatie is de verdamping van water. De verdamping van 1 gram water gaat gepaard met een warmteverlies van 2430 J. In rust verdampt dagelijks ca. 600 ml water via huid en longen. Dit veroorzaakt een continu warmteverlies van 14-18 W. Bij regulering van de lichaamstemperatuur speelt verdamping van water uit de longen en diffusie door de huid geen rol, maar is de zweetverdamping van belang.

2.1.1 Conductie

Indien er een temperatuurverschil aanwezig is binnen een vast lichaam of tussen twee vaste lichamen, zal er warmte gaan stromen van het warme gebied (T_2) naar het koude gebied (T_1) door middel van conductie. Deze warmtestroom per tijdseenheid wordt berekend door

$$Q = (k/x)\ (T_2 - T_1)\ Opp \qquad [W] \qquad (2)$$

waarbij

k	: warmtegeleiding van het materiaal	[W/m°C]
x	: afstand tussen het koude en warme gebied	[m]
Opp	: oppervlakte	[m^2]

(wet van Fourier)

De term k/x is de warmte-overdrachtscoëfficiënt in W/m^2°C. Deze coëfficiënt is afhankelijk van de thermische eigenschappen van het betreffende materiaal. De inverse term x/k is de thermische weerstand of isolatie, R.

2.1.2 Convectie

Warmtetransport door middel van convectie treedt op door stroming tussen een vast lichaam en een vloeibaar/vluchtig lichaam of binnen een vloeibaar/vluchtig lichaam. Bij convectie wordt warmte via "contact" tussen moleculen en door de beweging van moleculen getransporteerd. Er zijn twee vormen van convectie, te weten natuurlijke convectie en gedwongen convectie. Bij natuurlijke convectie verplaatsen de moleculen zich door dichtheidsverschillen binnen of tussen twee lichamen ten gevolge van <u>verschil in temperatuur</u>. In alle overige situaties spreken we van gedwongen convectie, bijvoorbeeld convectie ten gevolge van wind.
De warmtestroom door middel van convectie wordt door dezelfde vergelijking gegeven als bij conductie.

$$Q = h_c\ (T_2 - T_1)\ Opp \qquad (3)$$

waarbij

Q	: warmtestroom per tijdseenheid	[W]
h_c	: convectie coëfficiënt	[W/m^2°C]
T	: temperatuur	[°C]
Opp	: oppervlakte	[m^2]

2.1.3 Radiatie

Radiatie is warmte-uitwisseling door middel van electromagnetische straling. Straling met golflengten tussen 10^{-7} en 10^{-5} m transporteren grote hoeveelheden thermische energie. In Fig. 1 is het electromagnetische spectrum weergegeven.

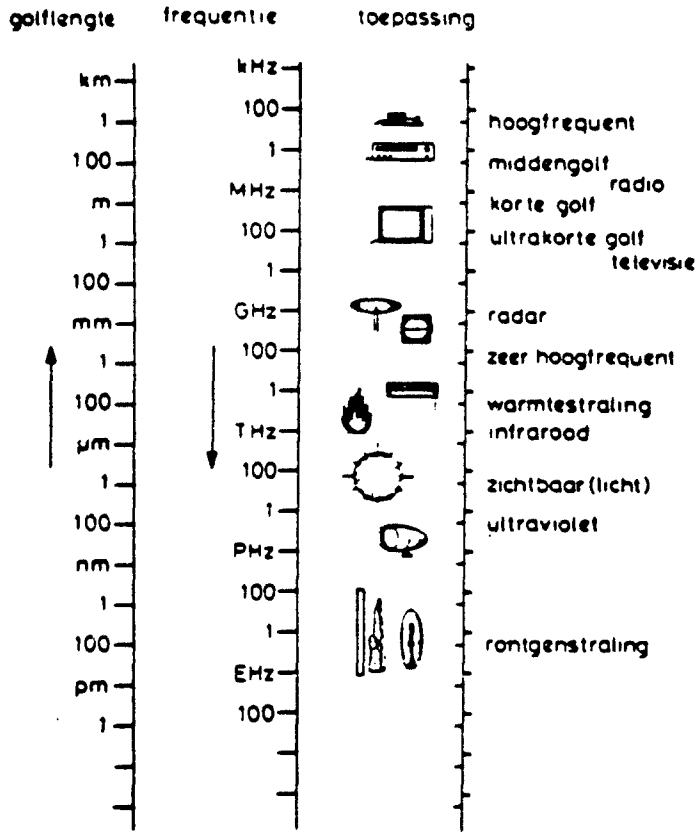

Fig. 1 Elektromagnetische straling gerangschikt naar frequentie en golflengte en de bijbehorende toepassingsgebieden.

Een zwart lichaam is gedefinieerd als een object dat alle straling van elke golflengte absorbeert. Volgens Kirchhoff is een dergelijk lichaam ook in staat alle straling te emitteren. De golflengte van de geëmitteerde straling is afhankelijk van de temperatuur en wordt beschreven door de wet van Planck.

$$W(\lambda) = (2\pi hc^2) \;/\; (\lambda^5 e(hc/\lambda kT) - 1) \qquad (4)$$

waarbij

h: constante van Planck	[6.6 10^{-34} W/s^2]
k: constante van Boltzmann	[1.1 10^{-23} J/K]
T: absolute temperatuur van het zwarte lichaam	[K]
c: lichtsnelheid	[3 10^{8} m/s]
λ: golflengte	[cm]

De totale energie die een zwart lichaam uitzendt wordt berekend door integratie van de wet van Planck voor $\lambda = 0$ tot $\lambda = \infty$ (Stefan-Boltzmann formule).

$$W = \sigma T^4 \tag{5}$$

waarbij

σ: constante van Stefan-Boltzmann	[5.67 10^{-8} W/m^2K^4]
W: totale energie uitgezonden door een zwart lichaam	[W/m^2]

De golflengte waarbij de emissie van een zwart lichaam maximaal is, is omgekeerd evenredig met zijn absolute temperatuur volgens de wet van Wien.

$$\lambda_{max} = 2898/T \tag{6}$$

Vele objecten zijn niet in staat alle straling te absorberen, maar zullen opvallende straling gedeeltelijk absorberen, reflecteren en transmitteren. De som van de geabsorbeerde, gereflecteerde en getransmitteerde straling is gelijk aan de opvallende straling, zodat de som van absorptie-, reflectie- en transmissiecoëfficiënten gelijk aan 1 is.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \tag{7}$$

α: absorptiecoëfficiënt
ρ: reflectiecoëfficiënt
τ: transmissiecoëfficiënt

Ook niet-zwarte-objecten kunnen straling emitteren, hoewel zij bij een gegeven temperatuur minder straling uitzenden dan een zwart lichaam. De emissie van een niet-zwart object kan berekend worden door:

$$W = \epsilon \sigma T^4 \tag{8}$$

waarbij

W: totale uitgezonden energie [W/m^2]

ϵ: emissiecoëfficiënt

σ: constante van Stefan-Boltzmann [$56.7\ 10^{-8} W/m^2K^4$]

(zie vergelijking 5)

2.1.4 Evaporatie

Zweetverdamping is een belangrijke manier van warmte-afvoer voor de mens. Naarmate de omgevingstemperatuur stijgt, zal de droge warmte-afgifte (radiatie, convectie en conductie) dalen door een kleiner temperatuurverschil tussen huid en omgeving. Het warmteverlies door middel van evaporatie is afhankelijk van de zweetproduktie en de mogelijkheid van zweetverdamping naar de omgeving (omgevingstemperatuur, relatieve vochtigheid van de lucht).

De hoeveelheid waterdamp die getransporteerd wordt is afhankelijk van het concentratieverschil tussen huid en omgeving, en kan beschreven worden volgens:

$$\dot{m} = D\ (C_{huid} - C_{omg}) \qquad (9)$$

met

$\dot{m}$: massa transport van waterdamp [g/m^2s]

D : massa transport coëfficiënt [m/s]

C_{huid}, C_{omg} : massadichtheid van waterdamp van respectievelijk huid en omgeving [g/m^3]

$$D = \frac{\mathbb{D}}{d} \qquad (10)$$

met

$\mathbb{D}$: diffusiecoëfficiënt [$25\ 10^{-6}\ m^2/s$]

d : luchtequivalent [m]

De hoeveelheid warmte die getransporteerd wordt, is gegeven door de formule:

$$E = He\ \dot{m} \qquad (11)$$

waarbij

E : warmtetransport [W/m^2]

He: verdampingswarmte [2430 J/g]

2.2 Warmtetransport in kleding

De warmte die iemand afstaat dan wel opneemt uit zijn omgeving wordt mede bepaald door de gedragen kleding. Hoe groter de isolatie van kleding is, des te minder warmte verloren gaat aan de omgeving. De isolatie van kleding is groter naarmate kleding dikker is of uit meer lagen bestaat. In een persoon met een laag onderkleding en een laag bovenkleding lopen een aantal warmtestromen. Tussen huid en onderkleding zijn drie warmtestromen te onderscheiden, een stralingswarmtestroom, een conductieve warmtestroom en een natte (verdampings) warmtestroom. In de luchtspleet tussen de onder- en bovenkleding stroomt warmte door convectie, straling en evaporatie en kunnen turbulenties optreden. Bovendien vindt luchtuitwisseling plaats tussen de aanwezige lucht in de luchtspleet en de buitenlucht. Deze ventilatie treedt met name op op plaatsen waar de buitenlucht direct in luchtspleet kan stromen, zoals door de openingen van mouwen en broekspijpen. Door het bewegen in kleding neemt de ventilatie toe en daardoor ook de warmtestroom. In de bovenkleding treedt warmtetransport ten gevolge van conductie op, terwijl de aanhangende luchtlaag van de bovenkleding door convectie beïnvloed wordt.
Indien een persoon aangestraald wordt met een externe warmtestralingsbron dringt een warmtestroom de kleding binnen. Afhankelijk van de materiaaleigenschappen van de kleding treedt in meer of mindere mate transmissie, reflectie en absorptie van de externe straling op. De reflectie-, transmissie- en absorptiecoëfficiënten zijn afhankelijk van de golflengten van de externe straling. In Fig. 2 is het verloop van de hierboven vermelde warmtestromen schematisch weergegeven.

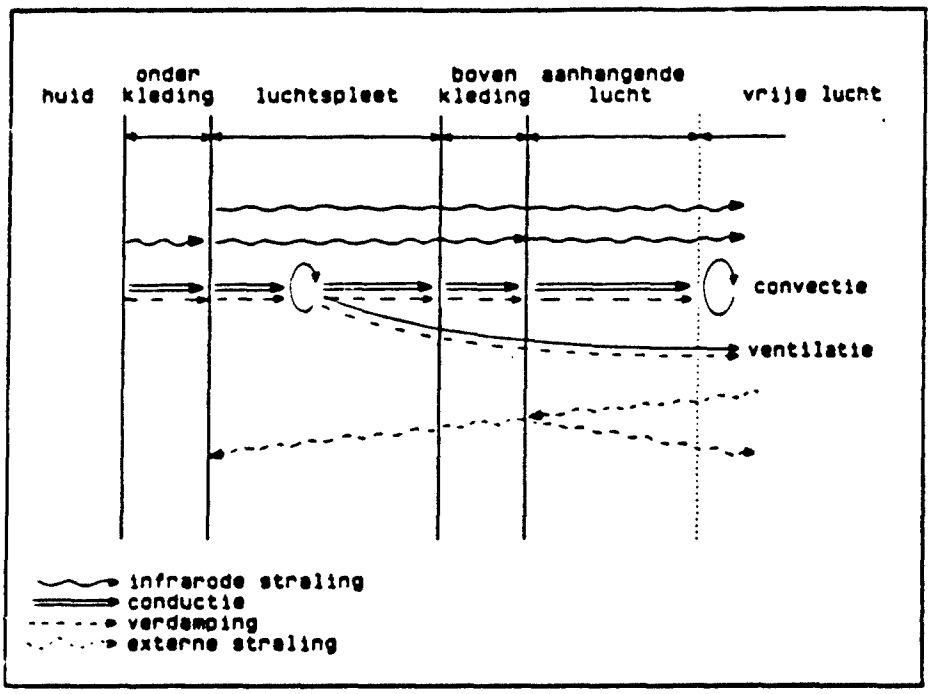

Fig. 2 Schematische voorstelling van een kledingensemble waar externe straling opvalt (gestippelde golflijn). De straling wordt in de infrarode golflengten uitgezonden vanaf alle kledinglagen (doorgetrokken golflijn). Daarnaast wordt ook warmte afgevoerd via convectie en ventilatie, zowel in de vorm van droge warmte als door verdamping.

2.2.1 Model voor droge warmte-afgifte

Door de in Fig. 2 weergegeven warmtestromen te plaatsen in een netwerk is het mogelijk voor het fysisch model een vervangschema op te stellen. De natte warmtestroom is nog buiten beschouwing gelaten (Fig. 3).

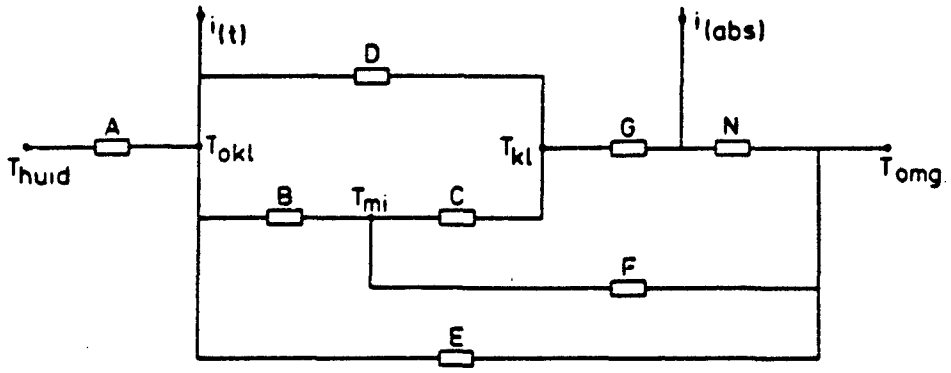

Fig. 3 Weerstandsnetwerk met daarin de verschillende warmteweerstanden zoals die volgen uit de warmtestromen in Fig. 2.

A : vervangingsweerstand van de parallel geschakelde weerstanden van straling en geleiding in de onderkleding
B : conductieve weerstand van de (halve) luchtspleet
C : conductieve weerstand van de (halve) luchtspleet
D : stralingsweerstand van de luchtspleet
G : weerstand van de bovenkleding
N : weerstanden van straling en convectie in de aanhangende luchtlaag
F : ventilatieweerstand
i(t) : getransmitteerde externe straling plus getransmitteerde stralingsuitwisseling tussen onderkleding en omgeving
i(abs): geabsorbeerde externe straling
T_{huid} : huidtemperatuur
T_{omg} : omgevingstemperatuur
T_{okl} : temperatuur van de onderkleding
T_{mi} : temperatuur van de luchtspleet (microklimaat)
T_{kl} : temperatuur van de bovenkleding

De weerstanden in Fig. 3 zijn gedefinieerd als de inverse waarden van de betreffende warmte-overdrachtscoëfficiënten.

$$A = \frac{1}{h_{okl}} \qquad [m^2 \cdot C/W] \qquad (12)$$

h_{okl}: warmte-overdrachtscoëfficiënt van de onderkleding

$$B = \frac{1}{h_{mi}} \qquad [m^2 \cdot C/W] \qquad (13)$$

h_{mi}: warmte-overdrachtscoëfficiënt, afhankelijk van de luchtbeweging in de in de luchtspleet tussen boven- en onderkleding.

$$h_{mi} = 8.3 \sqrt{v_{mi}} \qquad [W/m^2 \cdot C]$$

v_{mi}: luchtsnelheid in de luchtspleet

$$v_{mi} = 16 \text{ vent/spleetdikte} \qquad [m/s]$$

vent: ventilatie $[m^3/m^2s = m/s]$

$$C = B \qquad (14)$$

$$D = \frac{1}{h_r(mi)} \qquad [m2 \cdot C/W] \qquad (15)$$

$h_r(mi)$: warmte-overdrachtscoëfficiënt van de luchtspleet ten gevolge van straling.

$$h_r(mi) = \sigma\ \alpha_2\ (T_{okl}^4 - T_{kl}^4)\ /\ (T_{okl} - T_{kl}) \qquad [W/m^2 \cdot C]$$

$$E = \sigma\tau\ (T_{okl}^4 - T_{oms}^4)\ /\ (T_{okl} - T_{oms}) \qquad [m^2 \cdot C/W] \qquad (16)$$

T_{okl}: temperatuur van de onderkleding [°C]
T_{kl} : temperatuur van de bovenkleding [°C]
T_{oms}: temperatuur van de omgeving [°C]

waarbij is aangenomen dat de onderkleding "zwart" is, en α = absorptiecoëfficiënt van de bovenkleding, τ de transmissiecoëffiënt.

$$F = \frac{1}{\text{rho Cp vent}} \qquad [m^2 \cdot C/W] \qquad (17)$$

rho: dichtheid van lucht [1.18 kg/m^3]
Cp : specifieke warmte [10^3 J/kg°C]

$$G = \frac{1}{h_{kl}} \qquad [m^2 \cdot C/W] \qquad (18)$$

$$N = \frac{1}{(h_c + h_r)} \qquad [m^2 \cdot C/W] \qquad (19)$$

h_{kl}: warmte-overdrachtscoëfficiënt van de bovenkleding [$W/m^2 \cdot C$]
h_c : warmte-overdrachtscoëfficiënt van lucht ten gevolge van convectie [$W/m^2 \cdot C$]
h_r : warmte-overdrachtscoëfficiënt van lucht ten gevolge van straling [$W/m^2 \cdot C$]

$$h_c = 8.3 \sqrt{v} \qquad [W/m^2 \cdot C]$$

v: windsnelheid van de buitenlucht [m/s]

$$h_r = \frac{\sigma \, \alpha_2 \, (T_{kl}^4 - T_{oms}^4)}{(T_{kl} - T_{oms})} \qquad [W/m^2 \cdot C]$$

De stromen uit Fig. 3 zijn te berekenen door een achttal vergelijkingen op te stellen.

(1) $i(a) + i(t) = i(b) + i(d) + i(e)$

(2) $i(b) = i(f) + i(c)$

(3) $i(d) + i(c) = i(g)$

(4) $i(g) + i(abs) = i(n)$

(5) $D\ i(d) = B\ i(b) + C\ i(c)$

(6) $C\ i(c) + G\ i(g) + N\ i(n) = F\ i(f)$

(7) $T_{huid} - T_{oms} = A\ i(a) + D\ i(d) + G\ i(g) + N\ i(n)$

(8) $T_{huid} - T_{oms} = A\ i(a) + E\ i(e)$

waarbij de i's de stromen zijn door de in de index aangegeven weerstanden.

i(t): getransmitteerde externe straling

$$i(t) = \tau_i \, Ra \qquad [W/m^2] \qquad (20)$$

Ra: externe stralingsintensiteit [W/m²]
r_1: transmissiecoëfficiënt voor stralingsbron

De index 1 van de stralingscoëfficiënten slaan op de invallende straling van de bron, de index 2 op het verre infrarood.

i(abs): geabsorbeerde externe straling

$$i(abs) = \alpha_1 \, Ra \qquad [W/m^2] \qquad (21)$$

Dit stelsel kan door geschikte manipulatie (het vormen van lineaire combinaties van de gegeven vergelijkingen) opgelost worden via recurrente betrekkingen (Appendix I).
De temperaturen in de verschillende kledinglagen zijn berekend met behulp van de volgende vergelijkingen:

$$T_{okl} = T_{huid} - i(a)\,A \qquad [°C] \qquad (22)$$

$$T_{mi} = T_{okl} - i(b)\,B \qquad [°C] \qquad (23)$$

$$T_{kl} = T_{omg} + i(n)\,N \qquad [°C] \qquad (24)$$

2.2.2 Model voor evaporatie
Voor de natte warmte-afgifte is een gelijksoortig model op te stellen als voor de droge warmte-afgifte. Omdat er voor damptransport geen equivalent is van stralingsoverdracht, bevat het model minder termen en is het eenvoudiger op te lossen. In Fig. 4 is het netwerk voor evaporatie door de verschillende kledinglagen weergegeven.

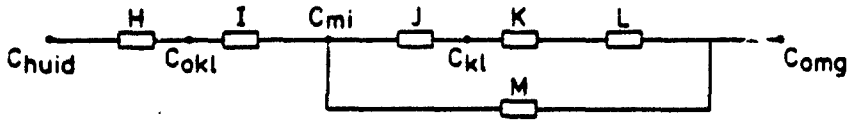

Fig. 4 Weerstandsnetwerk met vochtweerstanden overeenkomstig de vochtstromen in Fig. 2.

H : dampweerstand van de onderkleding
I : dampweerstand voor het convectieve/conductieve deel van de luchtspleet, eerste helft
J : idem, andere helft

K : dampweerstand van de bovenkleding
L : dampweerstand van de aanhangende lucht van de bovenkleding
M : dampweerstand van de ventilatie
C_{huid} : vochtconcentratie aan de huid
C_{omg} : vochtconcentratie in de lucht
C_{okl} : vochtconcentratie van de onderkleding
C_{mi} : vochtconcentratie in de luchtspleet
C_{kl} : vochtconcentratie van de bovenkleding

De dampweerstanden zijn uitgedrukt in meters. Het aantal meters komt overeen met de dikte van een stilstaande luchtkolom met eenzelfde diffusieweerstand. De volgende formules beschrijven de dampweerstand:

$$I = \frac{\lambda a}{h_{mi}} \qquad \text{[m luchtequivalent]} \qquad (25)$$

$$I = J \qquad \text{[m luchtequivalent]} \qquad (26)$$

$$L = \frac{\lambda a}{h_c} \qquad \text{[m luchtequivalent]} \qquad (27)$$

$$M = \frac{\mathbb{D}}{vent} \qquad \text{[m luchtequivalent]} \qquad (28)$$

waarbij $\mathbb{D}$ de diffusiecoëfficiënt van waterdamp in lucht is, met een waarde van 25 10^{-6} m^2/s en λa de warmte-overdrachtscoëfficiënt van de lucht is, met een waarde van .026 W/m°C.

De totale dampweerstand is gegeven door de formule:

$$d(tot) = H + I + \frac{1}{\frac{1}{J + K + L} + \frac{1}{M}} \qquad \text{[m luchtequivalenten]} \qquad (29)$$

De evaporatie is berekend door:

$$EVAP = He \frac{\mathbb{D}}{d(tot)} (C_{huid} - C_{omg}) \qquad [W/m^2] \qquad (30)$$

He: de verdampingswarmte van water [2430 J/g]

2.2.3 Het computermodel

Het computermodel (ConRad versie 1.1) is gebaseerd op de vergelijkingen uit 2.2.1. en 2.2.2. en is geschreven in FORTRAN. Het model gaat uit van twee lagen kleding. Het berekent temperaturen van boven- en onderkleding en van de tussenliggende luchtlaag (het microklimaat) bij verschillende stralingsintensiteiten. De huidtemperatuur wordt constant verondersteld. Binnen het model is onderscheid gemaakt tussen het spectrum van de opvallende straling en het verre infrarood in reflectie-, absorptie- en transmissiecoëfficiënt van de gedragen kleding in. Bovendien is rekening gehouden met de ventilatie in de kleding. In Tabel I staan de benodigde invoerparameters van het model weergegeven. Tussen haakjes staat telkens de huidige waarde, die desgewenst veranderd kan worden.

Tabel I Invoerparameters van het stralingsmodel.

Ventilatie	(50 $l/m^2.min$)
Warmte-overdrachtscoëfficiënt van de bovenkleding	(30.0 W/m^2K)
Fractie ongekleed oppervlak	(0.15)
Warmte-overdrachtscoëfficiënt van de onderkleding	(30 W/m^2K)
Breedte van de luchtspleet tussen onder- en bovenkleding	(13.0 mm)
Absorptiecoëfficiënt van de bovenkleding voor de opvallende kleding	(0.5)
Absorptiecoëfficiënt van de bovenkleding voor het verre infrarood	(0.8)
Transmissiecoëfficiënt van de bovenkleding	(0.1)
Absorptiecoëfficiënt van de onderkleding voor de opvallende straling	(0.7)
Absorptiecoëfficiënt van de onderkleding voor het verre infrarood	(0.8)
Huidtemperatuur voorzijde	(33°C)
Huidtemperatuur achterzijde	(33°C)
Relatie vochtigheid aan de huid	(45%)
Omgevingstemperatuur	(20°C)
Relatieve vochtigheid van de lucht	(50%)
Dampweerstand van de bovenkleding	(2.0 mm)
Windsnelheid	(0.2 m/s)

Sommige van deze parameters dienen geschat te worden, te weten de warmte-overdrachtscoëfficiënt van de bovenkleding, de dikte van de luchtspleet tussen onder- en bovenkleding, de absorptiecoëfficiënt voor het verre infrarood van de boven- en onderkleding en de isolatie van de onderkleding. Het model gaat er vanuit dat de warmtestraling

van de voorkant komt. Het lichaam is dan slechts gedeeltelijk aangestraald. Door het lichaam voor te stellen als een cilinder wordt de oppervlakte van de cilinder gegeven door:

$$A = 2\pi\ r\ l \qquad (31)$$

waarbij
r: straal van de cilinder
l: lengte van de cilinder

De projectie van de cilinder wordt berekend door:

$$\text{Projectie} = 2\ r\ l \qquad (32)$$

Dus de projectie (die staat voor de ingevangen hoeveelheid straling) is $1/\pi$ (ca. 1/3) van het oppervlak. In werkelijkheid wordt bij eenzijdige straling de helft van de cilinder bestraald met naar de rand toe afnemende intensiteit. Om de zaak niet nodeloos gecompliceerd te maken, wordt voor de warmtebalans verondersteld dat 1/3 van het lichaamsoppervlak wordt aangestraald met volle intensiteit.
Naast temperaturen berekent het model ook warmtestromen. Hierbij is rekening gehouden met het feit dat bij een gekleed persoon een deel van de lichaamsoppervlakte onbedekt is, zoals handen en gezicht. De warmtestroom door het ongeklede gedeelte wordt bepaald door de eigenschappen van de aanhangende luchtlaag.
De berekende warmtestromen betreffen de totale droge warmte-afgifte van de huid en van de kleding. Door sommering van de droge en de natte (evaporatieve) warmtestroom is de totale warmtestroom verkregen. Daarnaast wordt de warmtestroomdichtheid berekend aan het aangestraalde kledingoppervlak.

3 MODEL VOOR BEREKENING VAN TEMPERATUREN BIJ AANSTRALING VAN EEN DOEK

3.1 Straling op doek

Een sterk vereenvoudigd warmtewisselingsmodel is gebruikt om de temperatuur van een vrijhangend doek te berekenen. Deze berekening wordt gemaakt om de stralingseigenschappen van het materiaal te controleren. Indien warmtestraling van een bron op een doek valt, zal afhankelijk van de materiaaleigenschappen van het doek een deel van deze straling

geabsorbeerd, getransmitteerd en gereflecteerd worden. Het doek emitteert zelf ook weer straling, afhankelijk van zijn temperatuur. Deze geëmitteerde straling ligt in het langgolvige gebied van het warmtespectrum, evenals de straling uit de omgeving die op het doek valt. In Fig. 6 is het verloop van de warmtestraling schematisch weergegeven bij het aanstralen van een doek.

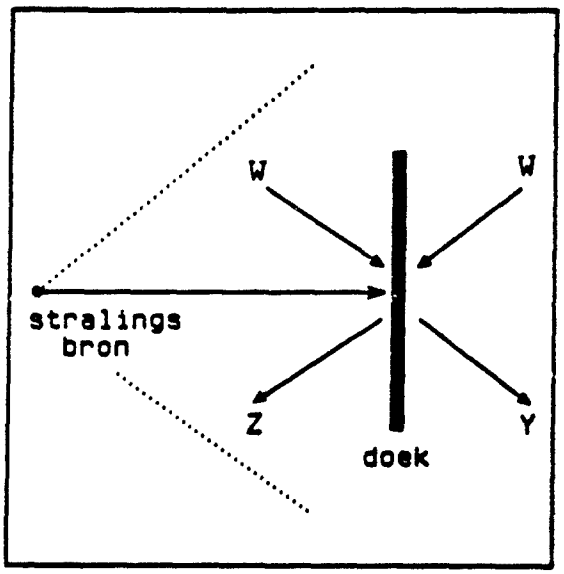

Fig. 5 Schematische weergave van straling die op een doek valt.

X: Straling afkomstig van de stralingsbron.
Y: Straling afkomstig van de niet-aangestraalde zijde van het doek.
Z: Straling afkomstig van de aangestraalde zijde van het doek.
W: Straling afkomstig uit de omgeving.

In formule:

$$Z = \epsilon_2 E + \rho_1 X + \rho_2 W + \tau_2 W \qquad (33)$$

$$Y = \epsilon_2 E + \tau_1 X + \tau_2 W + \rho_2 W \qquad (34)$$

met

E: σT^4, waarbij T de doektemperatuur voorstelt.
ϵ: emissiecoëfficiënt
ρ: reflectiecoëfficiënt
τ: transmissiecoëfficiënt

Het cijfer 1 in de index geeft aan dat het coëfficiënten in het golflengte gebied van de stralingsbron betreft, het cijfer 2 voor het verre infrarode gebied.

Daarnaast geldt:

$$X + 2W = Z + Y + \text{convectie} \qquad (35)$$

$$\text{convectie} = 2\ h_c\ (T_{doek} - T_{omg}) \qquad [W/m^2]$$

$$h_c = 8.3\ \sqrt{v} \qquad [W/m^2 \cdot C]$$

waarbij v de windsnelheid is in m/s

De bovenbeschreven formules zijn opgenomen in een computermodel, en wel zodanig dat de doektemperatuur berekend kan worden. De oplossing wordt iteratief gevonden.

De volgende parameters dienen in het model ingevoerd te worden:

1. straling afkomstig van de stralingsbron
2. straling van de omgeving
3. reflectiecoëfficiënt van het doek voor de warmtestralingsbron
4. emissiecoëfficiënt van het doek voor de warmtestralingsbron
5. emissiecoëfficiënt van het doek voor het infrarood
6. convectiecoëfficiënt

3.2 Het meten van doektemperaturen

3.2.1 Inleiding

Met behulp van bovenstaand model is het mogelijk om de temperatuur van het doek te voorspellen bij het aanstralen van het doek met een bepaalde hoeveelheid straling. In onderstaand experiment zijn de berekende doektemperaturen aan de hand van de theorie vergeleken met de gemeten temperaturen bij verschillende windsnelheden.

3.3 Materiaal en methode

Voor dit experiment zijn vier doeken met verschillende ϵ, ρ en τ aangestraald met een warmtestralingsbron. De reflectie- en transmissiecoëfficiënten bij een golflengte van 800-900 nm voor de vier doeken zijn gemeten met behulp van een spectrofotometer (PYE UNICAM SP-8-400 UV/VIS). Bij het bepalen van de reflectiecoëfficiënt bedraagt de hoek van inval van de opvallende bundel 8° en wordt de reflecterende stra-

ling diffuus gemeten. Bij het meten van de transmissie is de hoek van inval van de opvallende bundel 0° en is de doorvallende straling diffuus gemeten. De coëfficiënten in het infrarode gebied zijn bepaald aan de hand van transmissiecoëfficiënten uit het zichtbaar gebied, waarbij trans 1 = trans 2. In het verre infrarood wordt bijna alle niet-getransmitteerde warmte geabsorbeerd en weinig gereflecteerd (Cain and Farnworth, 1986). In Tabel II zijn de coëfficiënten van de vier doeken samengevat.

Tabel II Specificatie van de gebruikte doeken.

		visueel			IR		
materiaal	omschrijving	ε	ρ	τ	ε	ρ	τ
absorberend	polyester donker blauw 212 g/m²	.39	.50	.11	.80	.09	.11
reflecterend	gealuminiseerd 67 g/m²	.31	.65	.04	.30	.66	.04
transmitterend	losgeweven polyester (wit) 76 g/m²	.13	.36	.51	.40	.09	.51
absorberend	wol zwart	.75	.25	.00	.95	.05	.00

De opvallende straling bedraagt 950-1200 W/m². Langs de doeken werd wind geblazen met een snelheid van .2, .5 en 1.5 m/s bij een omgevingstemperatuur van 13°C. Met een Hund DRM Delta Radiometer zijn X, Y, W en Z gemeten. Bovendien werden de temperaturen van de doeken bepaald aan de aangestraalde en de niet-aangestraalde zijde met behulp van thermokoppels (type K). De omgevingstemperatuur is gemeten met behulp van een VAISALA HMI 32.

3.4 Resultaten

De hoogste temperatuur wordt gemeten aan het zwarte doek bij de laagste windsnelheid en de laagste temperatuur aan het transmitterend doek bij de hoogste windsnelheid. Bij hogere windsnelheden daalt de temperatuur van ieder doek.

In Fig. 6 zijn de gemiddelde gemeten temperaturen van de voor- en achterzijde uitgezet tegen de berekende temperaturen met het model, in Tabel III staan deze waarden uitgeschreven.

Tabel III Gemeten en berekende temperaturen bij een stralingsintensiteit X en verschillende windsnelheden.

	wind (m/s)	W/m^2 X	°C T (berekend)	°C T (gemeten)
Abs (bl.)	.2	1054	29.0	28.5
	.5	0124	24.4	25.1
	.5	1166	27.3	28.8
	1.5	1176	23.4	22.8
Refl.	.2	994	30.7	27.3
	.5	978	24.5	25.3
	.5	1093	27.2	25.8
	1.5	1063	21.7	20.2
Trans.	.2	1000	26.0	30.7
	.5	1078	16.2	24.5
	.5	1193	19.3	19.8
	1.5	1217	17.1	14.5
Abs. (zwart)	.2	967	35.9	37.8
	.5	958	30.9	32.0
	.5	1039	33.6	33.5
	1.5	1079	29.2	27.3

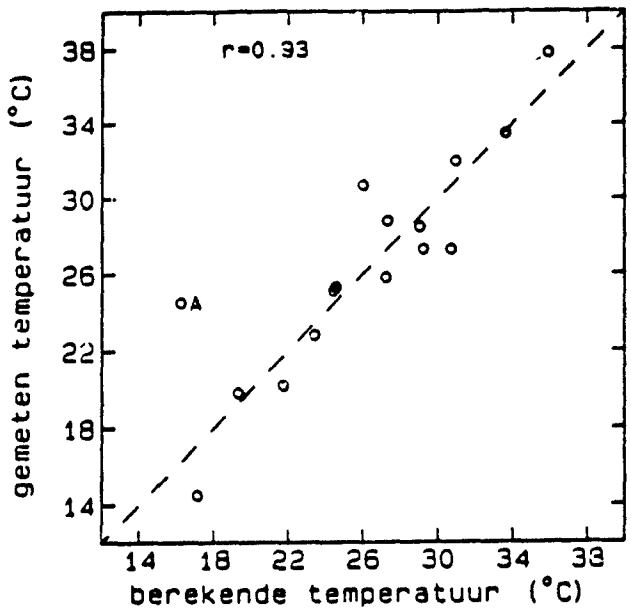

Fig. 6 Gemeten versus berekende oppervlaktetemperatuur van vier verschillende doeksoorten bij diverse straling- en windcondities.

Door de punten gaat een regressielijn met r = .932. Indien punt A buiten beschouwing wordt gelaten, stijgt r tot .972.

3.5 Discussie

Voor alle vier de doeken geldt dat de temperatuur aan de voorzijde van het doek hoger is dan aan de achterzijde van het doek. Dit is ook begrijpelijk omdat de straling van de stralingsbron op de voorzijde van de doeken valt. Het grootste temperatuurverschil tussen voor- en achterzijde is gemeten aan het reflecterende doek. Dit geeft aan dat in het reflecterende doek minder makkelijk warmte getransporteerd kan worden. Voor het transmitterende doek (een zeer open geweven doek) geldt dan ook dat de temperatuur aan de voorzijde gelijk is aan de achterzijde.
Het zwarte absorberende doek is het hoogst in temperatuur. Dit is ook te verwachten daar dit doek de hoogste absorptiecoëfficiënt bezit. Bij een hogere luchtsnelheid dalen alle doektemperaturen. Door verhoging van de luchtsnelheid neemt de convectie toe en wordt meer warmte

afgevoerd. Bij een windsnelheid van 0.2 m/s is de gemeten doektemperatuur van het transmitterend doek veel hoger dan de berekende temperatuur (punt A, Fig. 7). Een duidelijke verklaring is hiervoor echter niet te geven. De temperaturen van de doeken zijn twee maal bepaald bij een windsnelheid van 0.5 m/s. Het verschil in doektemperatuur bij deze windsnelheid wordt veroorzaakt door een verschil in ingestelde stralingsintensiteit.
In de bepaling van de transmissie-, reflectie- en absorptiecoëfficienten zit enige onzekerheid. Deze coëfficiënten zijn alleen bepaald voor golflengten tot 900 nm. Worden deze coëfficiënten in het model ingevoerd dan komen berekende en gemeten temperaturen goed met elkaar overeen, zodat aangenomen mag worden dat deze coëfficiënten bij benadering juist zijn.

4 DE INVLOED VAN STRALING, WIND EN BEWEGING OP KLEDINGTEMPERATUUR EN ISOLATIE

4.1 Inleiding

Indien een persoon, gekleed in een laag onder- en bovenkleding aangestraald wordt met een warmtestralingsbron, zullen er verschillende warmtestromen gaan lopen en bepaalde temperaturen heersen. Het model uit 2.2.1-2.2.3 berekent deze temperaturen en warmtestromen. Voor toetsing van het model zijn verschillende experimenten uitgevoerd. In het experiment van dit hoofdstuk is specifiek gekeken naar het effect van convectie, opgewekt door wind en beweging. Hierbij is echter de natte warmtestroom buiten beschouwing gelaten.

4.2 Materiaal en methode

4.2.1 Proefpersonen

In totaal participeerden vier mannelijke proefpersonen in het onderzoek. Hun lengte is gemiddeld 1.83 meter. In verband met de maat van de kleding is geselecteerd op lengte. Hun fysieke kenmerken zijn weergegeven in Tabel IV.

Tabel IV Fysieke kenmerken van de proefpersonen.

pp	gewicht (kg)	lengte (cm)	lich.opp. (DuBois) (m^2)
1	66.2	1.84	1.87
2	62.6	1.77	1.78
3	76.0	1.88	2.01
4	73.4	1.84	1.96

4.2.2 **Proefopstelling**

De proefpersonen stonden en liepen op een lopende band in een windtunnel van ca. 3.5 meter lengte. Achter de windtunnel was een windsimulator geplaatst, die lucht door de tunnel zuigt. De wind raakte de proefpersonen derhalve van voren. Aan de voorzijde van de windtunnel stond een zonsimulator met een stralingsintensiteit van 550 W/m^2. De proefpersonen ademden door een gesloten zuurstofsysteem, waarin de zuurstofconcentratie continu op 21% werd gehouden. De zuurstofopname werd bepaald door het uit een fles toegevoegde volume aan zuurstof af te lezen op een gasmeter. De geproduceerde CO_2 werd door middel van CO_2 absorbers verwijderd en circulerende lucht werd gekoeld en gedroogd via een koelblok.

De proefpersonen droegen een donkerblauw pak van dichtgeweven materiaal. De reflectie, transmissie en absorptie eigenschappen zijn overeenkomstig het absorberende blauwe doek beschreven in Par. 2.3 Tabel II. Dit pak bestaat uit een broek en een korte jas die er los overheen gedragen werd. Zowel aan de binnen- als aan de buitenzijde van het pak waren thermokoppels (koper/constantaan) aangebracht op de bovenarm, onderarm, boven- en onderbeen, zowel aan de voor als achterzijde van het pak, en op rug en borst.

Onder dit blauwe pak droegen de proefpersonen lang ondergoed (100% katoen) waar met behulp van thermistors (YSI 700 serie) de temperatuur van werd bepaald. De temperaturen werden gemeten op de borst, rug, onderbeen (achter), bovenbeen (voor en achter), bovenarm (voor en achter). De temperaturen en zuurstofopname werden elke seconde gesampeld en de minuutgemiddelden zijn opgeslagen in een data-acquisitie systeem.

In dit onderzoek was alleen de droge warmte-afgifte van belang. Om de warmtestroom ten gevolge van zweetverdamping tegen te gaan waren de proefpersonen in PVC-folie gewikkeld (Lotens e.a., 1988). De folie is

vervolgens beschouwd als huid. Op deze "huid" zijn eveneens thermistors aangebracht. Voor het comfort van de personen droegen zij onder het plastic lang, vochtabsorberend ondergoed.

4.2.3 Proefopzet

In het experiment waren drie condities opgenomen, te weten staan en lopen (4 km/uur), beide nagenoeg in stilstaande lucht, en staan in de wind (1 m/s). Deze drie condities werden zowel met als zonder zon uitgevoerd. In totaal waren er dus 4 proefpersonen * 3 condities * 2 (wel of geen zon) = 24 verschillende metingen.
De temperatuur van de klimaatkamer was zo ingesteld dat de proefpersonen na verloop van tijd thermisch evenwicht bereikten. Deze klimaatkamertemperaturen waren geschat aan de hand van het computermodel (2.2.3). De proefpersonen stonden of liepen gedurende een uur. Tijdens dit uur werden de temperaturen van de verschillende kledinglagen gemeten (zie 4.2.2), de rectaaltemperatuur (12 cm vanaf de rectale sfincter) en de luchttemperatuur. Tevens was continu de zuurstofopname geregistreerd.
De volgorde van de verschillende metingen was over de proefpersonen gebalanceerd evenals tussen morgen en middag.

4.2.4 Formules

De plastictemperatuur is gemeten op negen verschillende plaatsen (4.2.2). Hieruit is de gemiddelde "huid"temperatuur aan de voor- en achterzijde van het lichaam en van het totale huidoppervlak te berekenen, door elke meetplaats relatief aan zijn lichaamsoppervlak mee te wegen. De temperaturen zijn uitgedrukt in graden Celsius. In Tabel V zijn de weegfactoren voor huid, onderkleding en bovenkleding weergegeven.

Tabel V Weegfactoren voor de verschillende gemiddelde temperaturen.

	voorzijde						achterzijde					
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
huid voor	.07	.19		.35	.39							
huid achter							.07	.19		.35	.39	
huid gemiddeld	.02	.06		.12	.13		.05	.13		.23	.16	
onderkleding voor		.20		.38	.42							
onderkleding achter								.20		.38	.20	.22
onderkleding gemiddeld		.07		.13	.14			.13		.25	.14	.14
bovenkleding voor		.10	.10	.38	.20	.22						
bovenkleding achter								.10	.10	.38	.20	.22
bovenkleding gemiddeld		.03	.03	.13	.07	.07		.07	.07	.25	.13	.15

a = voorhoofd
b = bovenarm
c = onderarm
d = borst
e = bovenbeen
f = scheen
g = achterhoofd
h = bovenarm
i = onderarm
j = rug
k = bovenbeen
l = kuit

Voor iedere meetsessie is de droge warmte-afgifte berekend door:

$$DRY = METAB - RESP - EVAP - STO \qquad (36)$$

waarin

DRY : droge warmte-afgifte [W/m^2]

METAB: metabolisme [W/m^2]

RESP : warmteverlies door convectie via de ademhaling volgens Fanger (1970) [W/m^2]

EVAP : warmteverlies door verdamping van vocht uit de longen en via lek in het plastic [W/m^2]

STO : warmte-opslag in het lichaam [W/m^2]

$METAB = (16{,}33\ VO_2 + 4{,}6\ VCO_2) / (Odu\ 60)$ [W/m²] (37)
(Weir, 1949)

met
VO_2 : zuurstofopname [ml/min STPD]
VCO_2: CO_2 uitscheiding [ml/min STPD]
Odu : lichaamsoppervlak volgens DuBois en DuBois (1916) [m²]

De CO_2 uitscheiding is niet gemeten. Het respiratoir quotiënt is bij staan gesteld op 0.80 en bij lopen op 0.85.

$RESP = .0014\ METAB\ (34 - T_{inademlucht})$ [W/m²]

Het warmteverlies door verdamping van vocht uit de longen is berekend door (Fanger, 1970):

$Eresp = .0023\ METAB\ (44 - pa)$ [W/m²] (38)

waarin
pa: partiële druk van waterdamp van de ingeademde lucht [mmHg]

Het gewichtsverlies van de proefpersonen is bepaald door de proefpersonen voor en na elke meetsessie te wegen.
Het totale gewichtsverlies wordt niet alleen veroorzaakt door de verdamping van vocht uit de longen en metabool gewichtsverlies. Het overige vochtverlies is voor 75% toegeschreven aan speekselverlies in het gesloten zuurstofsysteem en voor 25% aan zweetverdamping tussen het plastic door.

Het totale warmteverlies ten gevolge van vochtverdamping:

$EVAP = Eresp + dPlastic/dt * 2430/Odu$ [W/m²] (39)

waarin
dPlastic/dt: gewichtsverlies via zweetverdamping ten gevolge van lek in plastic per tijdseenheid
2430 : verdampingswarmte [J/g]

De warmte-opslag in het lichaam is gedefinieerd door:

$STO = MASSA\ (.9\ dTrectaal/dt + .1\ dTplastic/dt)\ 3.48/Odu$
[W/m²] (40)

waarin

MASSA	: gewicht proefpersoon	[kg]
dTrectaal/dt	: verandering in kerntemperatuur per tijdseenheid	
dTplastic/dt	: verandering in plastictemperatuur per tijdseenheid	
3.48	: warmtecapaciteit van lichaamsweefsel	[J/g°C]

In het lichaam vond weinig warmte-opslag/verlies plaats. De proefpersonen bereiken namelijk na verloop van tijd thermisch evenwicht. Hierdoor veranderen de rectaal en plastic temperatuur nauwelijks meer. De weegfactoren voor rectaal en plastic temperatuur wijken af van de normaliter gebruikte factoren voor kern en huid (respectievelijk .8 en .2). Hiervoor is gekozen omdat het plastic iets van de huid ligt, waardoor de verandering in oppervlaktetemperatuur van het lichaam overschat zou worden (Havenith en Heus, 1988).

4.3 Resultaten

4.3.1 Metabolisme

Aan de hand van de gemeten zuurstofopname per minuut is het metabolisme van de proefpersonen berekend (zie 3.2.4). De gemiddelde waarde over de proefpersonen voor het metabolisme bij staan bedraagt 67 W/m^2 en voor lopen 165 W/m^2. In Appendix II zijn de warmtebalansgegevens per meetsituatie weergegeven.

4.3.2 Temperaturen in de niet-zon-conditie

De gemiddelde temperaturen van "huid", onderkleding en het binnen- en buitenzijde van bovenpak voor de drie verschillende condities (staan, staan in de wind en lopen) zijn weergegeven in Tabel VI.

Tabel VI Gemiddelde temperatuur (°C) aan de "huid", onderkleding, binnen- en buitenzijde van de bovenkleding. ST = staan in stilstaande lucht, STW = staan in wind (1 m/s), L = lopen (4 km/u) in stilstaande lucht.

		T huid	T onder-kleding	T boven-kleding (binnen)	T boven-kleding (buiten)	T omgeving
ST	voor	26.9	24.0	18.6	17.8	12.1
	achter	26.5	23.4	19.0	18.7	12.1
	gemiddeld	26.7	23.6	18.9	18.4	12.1
STW	voor	29.2	26.4	22.5	21.9	20.4
	achter	28.7	26.8	23.5	23.1	20.4
	gemiddeld	28.8	26.7	23.2	22.7	20.4
L	voor	28.4	24.0	18.6	17.7	12.4
	achter	27.5	24.1	19.2	18.7	12.4
	gemiddeld	27.8	24.0	19.0	18.4	12.4

In alle condities wordt de laagste temperatuur aan de buitenzijde van het pak gemeten en de hoogste temperatuur aan het plastic. De temperaturen van de verschillende kledinglagen tijdens staan en lopen zonder wind verschillen niet significant van elkaar. Bij staan in de wind liggen de temperaturen aanzienlijk hoger. Hierbij dient in ogenschouw genomen te worden dat de omgevingstemperatuur bij staan in wind 10°C hoger is dan bij staan en lopen. Significante verschillen tussen de voor- en achterkant van het pak zijn gevonden bij staan in wind en lopen.

Daar de omgevingstemperatuur bij staan in wind 10°C hoger is, zijn de gemeten temperaturen niet vergelijkbaar met de temperaturen bij de andere twee condities. Door echter het temperatuurverschil tussen de kledinglagen als percentage van de totale gradiënt (T_{huid} - T_{lucht}) uit te drukken, zijn de drie condities wel te vergelijken. In Fig. 7 is dit percentage (cumulatief) op de verticale as weergegeven, terwijl in Tabel VII de percentages uitgeschreven zijn. Op de horizontale as staan de verschillende kledinglagen.

Tabel VII Het temperatuurverschil tussen de opeenvolgende kledinglagen uitgedrukt in percentages (%) van de totale gradiënt (T_{huid} - T_{omg}) zonder zon, ST = staan in stilstaande lucht, STW = staan in wind (1 m/s), L = lopen (4 km/u).

	huid voor	okl achter	okl voor	pakbi achter	pakbi voor	pakbui achter	pakbui voor	omg achter
ST	19.7	21.9	36.5	29.9	5.5	2.4	38.4	45.9
STW	32.0	22.6	43.6	39.8	7.2	5.2	17.2	32.5
L	27.7	22.7	33.6	32.3	5.6	3.3	33.1	41.8

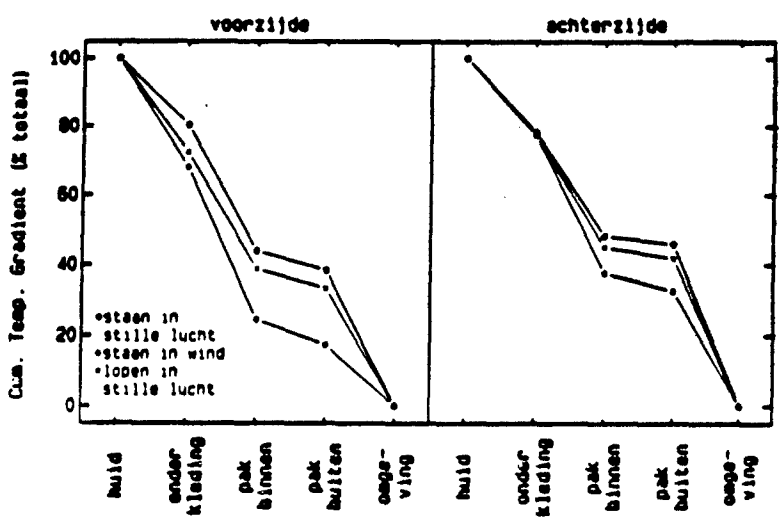

Fig. 7 Cumulatieve temperatuurgradiënt voor de diverse lagen in het kledingensemble zonder zon voor drie verschillende condities (ST, STW en L).

Het verloop van de gradiënten voor lopen en staan vertoont grote overeenkomsten. Bij staan in wind ligt de grafiek aanzienlijk lager aan de voorzijde dan voor de overige condities.

4.3.3 Temperaturen in de zon-conditie

Bij het aanstralen van de proefpersonen met ca. 550 W/m² worden temperaturen gemeten die zijn weergegeven in Tabel VIII. Evenals in de niet-zon-conditie wordt, zowel aan de voor- als aan de achterzijde, de hoogste temperatuur bij de huid gemeten en de laagste temperatuur bij

het pak. Een uitzondering hierop vormt de hoge onderkleding temperatuur aan de voorzijde in de staan-conditie. De temperaturen aan de voor- en achterzijde verschillen in iedere conditie significant van elkaar ($p < .005$).

Tabel VIII Gemiddelde temperaturen (°C) aan "huid", onderkleding, binnen- en buitenzijde van de bovenkleding. ST = staan in stilstaande lucht, STW = staan in wind (1 m/s), L = lopen (4 km/uur) in stilstaande lucht bij een stralingsintensiteit van 550 W/m^2.

	T huid	T onder kleding	T boven kleding (binnenzijde)	T boven kleding (buitenzijde)	T omgeving
ST voor	36.4	37.9	37.5	30.0	5.0
voor*			37.4	36.0	
achter	25.0	21.3	15.4	14.4	5.0
gemiddeld	28.7	26.8	21.0	19.6	5.0
STW voor	30.5	29.6	22.0	20.8	10.0
voor*			24.7	23.6	
achter	25.1	22.5	16.8	16.5	10.0
gemiddeld	26.9	24.9	18.6	17.9	10.0
W voor	33.2	33.0	26.7	25.9	5.0
voor*			30.0	29.7	
achter	27.0	22.2	15.3	14.7	5.0
gemiddeld	29.1	25.8	19.1	18.4	5.0

* Gemiddelde temperatuur zonder de temperatuur van de schenen, daar de stralingsintensiteit bij de schenen lager was.

De hoogste temperaturen zijn gemeten bij de staan conditie. Hierbij treedt ook de minste ventilatie op. Evenals bij de zon-conditie worden de verschillende condities vergelijkbaar gemaakt door de relatieve gradiënt te berekenen. In Fig. 8 is het cumulatieve percentage uitgezet tegen de kledinglagen. In Tabel IX zijn de relatieve gradiënten samengevat.

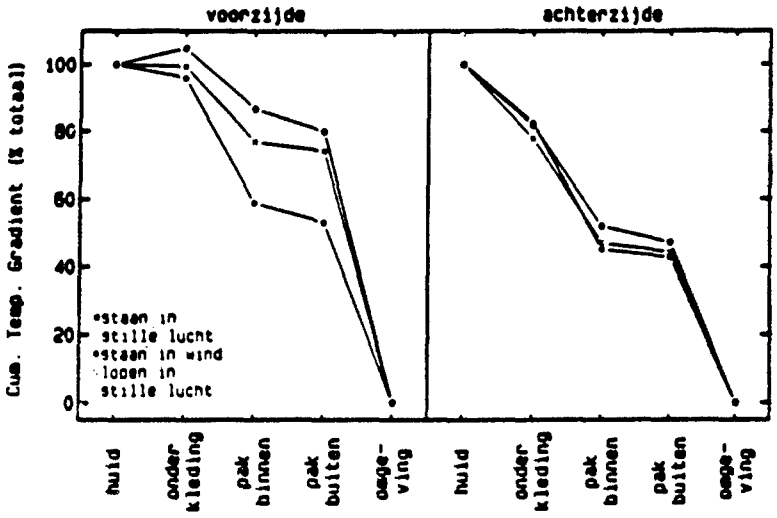

Fig. 8 Cumulatieve temperatuurgradiënt van de verschillende lagen in het kledingensemble met zon op de voorzijde bij drie verschillende condities (ST, STW en L).

Tabel IX Het temperatuurverschil tussen de kledinglagen uitgedrukt in percentage (%) van de totale gradiënt (T_{huid} - T_{omg}) met zon, ST = staan in stilstaande lucht, STW = staan in wind (1 m/s), L = lopen (4 km/uur).

	huid voor	okl achter	okl voor	pakbi achter	pakbi voor	pakbui achter	pakbui voor	omgeving achter
ST	-4.8	18.3	18.2	29.8	6.8	4.9	79.8	46.9
STW	4.2	17.5	37.1	37.5	5.8	2.4	52.9	42.6
L	0.7	22.1	22.5	31.0	2.8	2.8	74.1	44.1

Evenals in de niet-zon-conditie lijken de figuren voor lopen en staan veel op elkaar. De gradiënt van onderkleding naar binnenzijde pak (voor) is bij staan in wind aanzienlijk groter dan bij staan en lopen (staan wind 37.1% ten opzichte van lopen 22.5%, staan 18.2%). Daarentegen is het temperatuurverschil tussen buitenzijde pak en omgevingstemperatuur (voor) bij staan en lopen hoger dan bij staan in wind

(staan 79.8%, lopen 74.1% en staan wind 52.9%). Aan de achterzijde verschillen de gradiënten nauwelijks van elkaar voor de drie condities.

4.3.4 Warmte-overdrachtscoëfficiënten

De warmte-overdrachtscoëfficiënt van de aanhangende luchtlaag van het ensemble is gedefinieerd als:

$$h_{lucht} = DRY / (O_{kl} (T_{kl}(bui) - T_{omg})) \qquad [m^2 °C/W] \qquad (41)$$

waarin

Okl : .17 Odu + Opak [m^2]

Opak: 2.2 m^2

De warmte-overdrachtscoëfficiënt van het pak wordt gegeven door:

$$h_{pak} = DRY / ((T_{huid} - T_{kl}(bui)) Odu) \qquad [m2°C/W] \qquad (42)$$

De warmte-overdrachtscoëfficiënt van het totale kledingpakket is gegeven door:

$$h_{tot} = DRY / ((T_{huid} - T_{omg}) Odu) \qquad [m2°C/W] \qquad (43)$$

In Tabel X zijn de warmte-overdrachtscoëfficiënten van het pak weergegeven in de drie verschillende condities zonder zon.

Tabel X Warmte-overdrachtscoëfficiënt van de kleding in m^2°C/W. St = staan in stilstaande lucht, STW = staan in wind (1 m/s), L = lopen (4 km/uur).

	h_{lucht}	h_{pak}	h_{totaal}
ST	7.0	7.0	4.0
STW	20.1	10.0	7.3
L	14.9	12.4	7.6

Hieruit blijkt dat wind met name van invloed is op de warmte-overdrachtscoëfficiënt van de aanhangende luchtlaag. Door lopen (beweging) verandert voornamelijk de warmte-overdrachtscoëfficiënt van het pak.

4.3.5 Gemeten versus berekende temperaturen

Bij berekening van de kledingtemperaturen met behulp van het stralingsmodel (1.2.1-1.2.3) zijn voor de gemeten parameters warmte-overdrachtscoëfficiënt van de bovenkleding en fractie onbedekt huidoppervlak de waarden 50 W/m^2K en .17 ingevoerd en is de dikte van de luchtlaag tussen boven- en onderkleding geschat op 13 mm. De ventilatie is gemeten en staat beschreven in Par. 5. De parameters die betrekking hebben op de natte warmtestroom zijn niet van toepassing in dit experiment.

In Fig. 9 is de gemeten kledingtemperatuur uitgezet tegen de berekende temperatuur, terwijl in Tabel XI de waarden uit de grafiek zijn weergegeven.

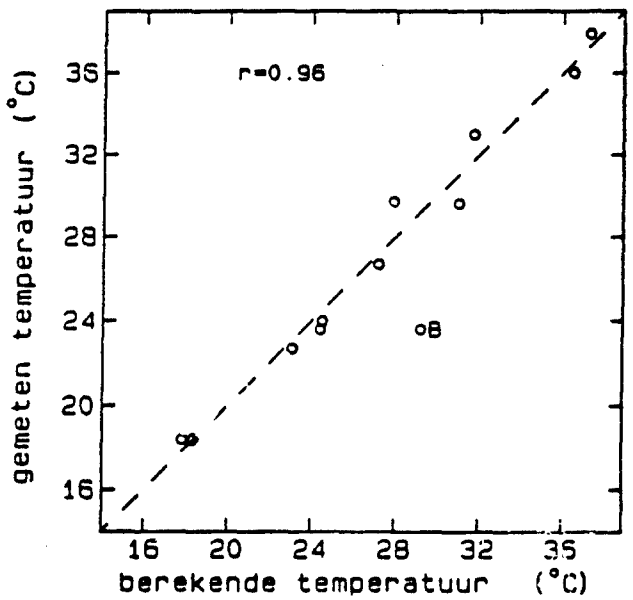

Fig. 9 Gemeten versus berekende temperatuur van boven- en onderkleding voor drie verschillende condities (ST, STW en L) met en zonder zon.

Tabel XI Gemeten en voorspelde temperaturen (°C) en droge warmtestroom (W/m^2). ST = staan in stilstaande lucht, STW = staan in wind (1 m/s), L = lopen (4 km/uur) in stilstaande lucht.

	berekend			gemeten		
	T_{okl}	T_{kl}	droge warmtestroom	T_{okl}	T_{kl}	droge warmtestroom
straling						
ST	37.3	36.5	63	37.9	36.0	49
STW	31.0	29.2	65	29.6	23.6	54
L	31.7	27.9	113	33.0	29.7	113
geen straling						
ST	24.4	18.3	65	23.6	18.4	58
STW	27.2	23.1	51	26.7	22.7	62
L	24.5	17.8	96	24.0	18.4	117

Zowel in de zon als niet-zon-conditie komen gemeten en berekende temperaturen goed met elkaar overeen, voor onder- en bovenkleding. Met uitzondering van staan in de wind bovenkleding (punt B, Fig. 9). Het gemiddelde temperatuurverschil tussen berekende en gemeten kledingtemperaturen bedraagt 0.4°C (SD = 1.9). Het verschil in warmtestroom van de huid bedraagt 0 W (SD = 13).

4.4 Discussie

Niet-zon-conditie

De temperaturen voor lopen en staan stemmen nauw met elkaar overeen. Bij lopen worden echter lagere temperaturen verwacht dan bij staan door de grotere warmte-afvoer via convectie. Deze warmte-afvoer wordt echter gecompenseerd door het hogere metabolisme bij lopen.

In alle drie de condities (staan, staan in wind, lopen) geldt dat een hogere temperatuur aan de achterzijde buitenkant pak gemeten wordt dan aan de voorzijde. (Dit verschil is echter niet significant voor staan zonder wind). Bij staan in wind is dit wel begrijpelijk daar de wind de proefpersonen aan de voorzijde raakt. Bij lopen (en staan) duidt dit erop dat er meer luchtbeweging aan de voorzijde aanwezig is dan aan de achterzijde van het pak.

Het effect van wind is duidelijk waarneembaar in het verloop van de gradiënten (Fig. 7). De relatieve gradiënt van buiterzijde pak naar omgeving is bij staan in wind aanzienlijk kleiner dan bij staan en lopen, hetgeen dus een verlaging van de paktemperatuur inhoudt. Deze gradiënt is aan de achterzijde niet wezenlijk verschillend van de andere twee condities. De wind beïnvloedt dus alleen de voorzijde en heeft weinig of geen effect op de achterzijde van de kleding.

Zon-conditie

Het pak transmitteert ca. 10% van de opvallende straling. Hierdoor wordt in de staan conditie aan de onderkleding een hogere temperatuur gemeten dan aan de huid. Deze hoge onderkledingtemperatuur vinden we niet terug bij staan in wind en lopen door de toegenomen convectie en ventilatie.

Door het absorberen van de opvallende straling stijgt het pak in temperatuur waardoor de relatieve gradiënt van buitenzijde pak naar omgeving ten opzichte van de niet-zon-conditie toeneemt. Het verloop van de gradiënt aan de achterzijde verschilt niet van de gradiënt aan de achterzijde in de niet-zon-condities. De zon heeft dus alleen invloed op de voorzijde of aangestraalde deel van het pak.

Isolaties

De invloed van de wind is ook in de warmte-overdrachtscoëfficiënten terug te vinden. Wind beïnvloedt met name de aanhangende luchtlaag van de kleding terwijl beweging meer van invloed is op de warmte-overdrachtscoëfficiënt van het pak. Dit effect is eveneens door Havenith en Heus (1988) gevonden.

De isolatiewaarden (inverse waarden van de warmte-overdrachtscoëfficiënten) inclusief de blote delen zijn vergeleken met de in de literatuur gevonden waarden. Zowel de intrinsieke pakisolatie als de luchtisolatie stemmen goed overeen met waarden gevonden door Olesen e.a. (1982) en Nielsen e.a. (1985). Het kledingpakket bij het experiment van Olesen bestond uit kort ondergoed, T-shirt, een shirt met lange mouwen, broek, jack, sokken en schoenen. De proefpersonen in het experiment van Nielsen droegen een vergelijkbaar kledingensemble. Zij droegen echter geen shirt met lange mouwen onder het jack. De door Havenith en Heus (1988) gemeten intrinsieke pakisolatie is lager dan de door ons gemeten waarden. Dit is niet te verwachten op grond van de kleding, die bestaat uit een werkbroek, poloshirt, sweater, sokken en schoenen. De luchtisolatie stemt daarentegen wel goed overeen.

Door beweging en wind daalt de kledingisolatie. Lotens en Havenith (1989) hebben de verandering van de totale kledingisolatie door lopen en door wind beschreven met regressievergelijkingen. De totale isola-

tie berekend met de vergelijkingen komen goed overeen met de in dit experiment gevonden totale kledingisolatie (gemeten totale isolatie bij lopen: 0.13 m^2°C/W, berekend: 0.16 m^2°C/W; bij wind gemeten: 0.14 m^2°C/W berekend: 0.16 m^2°C/W).

Stralingsmodel
Het model voorspelt de gemeten temperaturen met een gemiddeld afwijking van 0.4°C (SD = 1.9). Het grootste verschil tussen gemeten en berekende temperatuur is de paktemperatuur buitenzijde bij staan in wind (punt B, Fig. 9). Een aannemelijke verklaring voor deze discrepantie is niet direct te vinden.
De voorspelde droge warmte-afgifte en de gemeten droge warmte-afgifte komen goed met elkaar overeen in zowel de zon als de niet-zon-conditie (gemiddeld verschil: 0 W (SD = 13). De gemeten warmtastroom bij lopen is iets hoger dan de berekende warmtestroom, wellicht omdat door het zwaaien van de armen er meer warmte afgevoerd kan worden via de handen dan wanneer de handen stil hangen. Binnen het model is hiervoor niet gecorrigeerd. Wel voor de isolatie van de schoenen en het haar.

5 DE INVLOED VAN REFLECTIE, TRANSMISSIE EN ABSORPTIE OP KLEDING-TEMPERATUUR EN ISOLATIE

5.1 Inleiding

Voor een tweede toetsing van het stralingsmodel (1.2.1-1.2.3) zijn drie pakken getest. Deze pakken verschillen sterk van elkaar in reflectie, transmissie en absorptie eigenschappen. De pakken zijn gemaakt van de doeken beschreven in Tabel II en eender van model. Van deze pakken zijn de temperaturen bepaald, bij aanstraling met een warmtestralingsbron van ca. 800 W/m^2 en zonder warmtestraling, in een proefpersoonexperiment. Het verschil met het vorige experiment is dat er nu slechts een activiteit is (lopen), maar verschillende kleding.

5.2 Materiaal en methode

5.2.1 Proefpersonen
Aan dit onderzoek namen vier mannen deel. Hun fysieke kenmerken zijn weergegeven in Tabel XII. Proefpersoon 4 is weliswaar lang, maar paste de kleding toch.

Tabel XII Fysieke kenmerken van de proefpersonen.

pp	gewicht (kg)	lengte (m)	DuBois lichaams-oppervlak (m^2)
1	75	1.80	1.94
2	76	1.80	1.95
3	78	1.84	2.01
4	76	1.95	2.07

5.2.2 Proefopstelling

De proefopstelling is vergelijkbaar met het bovenstaande experiment naar de invloed van beweging, wind en straling op kledingtemperatuur en -isolatie. Het enige verschil is dat de paktemperatuur aan de binnenzijde niet gemeten wordt. Naast het gedragen pak in bovenstaand experiment, dragen de proefpersonen nog twee andere pakken, te weten een reflecterend en een transmitterend pak. De proefpersonen voeren slechts één activiteit, lopen, uit.
Voor een gedetailleerde beschrijving van de proefopstelling zie Par. 2.2.

5.2.3 Proefopzet

De proefpersonen lopen gedurende een uur met een snelheid van 4 km/uur en een wind van 0.5 m/s, in tegenstelling tot het experiment uit Par. 3, waarin er geen wind tijdens het lopen aanwezig was. De omgevingstemperatuur bedraagt 10°C indien de personen geen straling ontvangen, 2°C als de proefpersonen wel aangestraald worden. De stralingsintensiteit bedraagt 800 W/m^2.

5.3 Resultaten

5.3.1 Metabolisme

Het gemiddelde metabolisme over de proefpersonen en sessies bedraagt 160 W/m^2. In Appendix III zijn de warmtebalansgegevens per meetsituatie weergegeven.

5.3.2 Temperaturen in de niet-zon conditie

In Tabel XIII zijn de temperaturen van huid, onder- en bovenkleding voor het reflecterende, transmitterende en absorberende pak samengevat.

Tabel XIII Gemiddelde temperaturen (°C) aan de "huid", onder- en bovenkleding tijdens lopen (4 km/uur) in wind (0.5 m/s). A = absorberend pak, R = reflecterend pak, T = transmitterend pak.

		T huid	T onder-kleding	T boven-kleding	T omgeving
A	voor	26.5	23.3	16.1	10.5
	achter	27.4	24.4	17.1	10.5
	gemiddeld	27.1	24.0	16.7	10.5
R	voor	26.5	23.4	15.6	10.4
	achter	27.6	23.7	16.7	10.4
	gemiddeld	27.2	23.6	16.3	10.4
T	voor	25.2	21.2	14.3	10.5
	achter	26.4	22.2	15.9	10.5
	gemiddeld	26.0	21.9	15.4	10.5

De gemeten temperaturen van de drie pakken liggen dicht bij elkaar. De huidtemperatuur en de temperaturen van onder- en bovenkleding zijn echter lager bij het transmitterend pak dan bij de andere twee pakken. Alleen het verschil tussen de paktemperatuur van het absorberend en het transmitterend pak is significant.

5.3.3 Temperaturen in de zon-conditie

Door het aanstralen van de proefpersonen met de zonsimulator (ca. 800 W/m^2) stijgt de temperatuur van de kleding aan de voorzijde aanzienlijk ten opzicht van de achterzijde. In Tabel XIV zijn deze temperaturen gemiddeld over de proefpersonen weergegeven.

Tabel XIV Gemiddelde temperaturen (°C) aan de "huid", onder- en bovenkleding tijdens lopen (4 km/uur) in wind (0.5 m/s) bij een stralingsintensiteit van 800 W/m². A = absorberend pak, R = reflecterend pak, T = transmitterend pak.

		T huid	T onder-kleding	T boven-kleding	T omgeving
A	voor	36.1	35.8	31.0	2.0
	voor*			34.0	
	achter	28.5	23.7	15.7	2.0
	gemiddelde	30.7	26.8	20.8	2.0
R	voor	31.7	29.8	23.1	2.0
	voor*			27.2	
	achter	26.6	22.1	12.8	2.0
	gemiddelde	28.2	24.9	16.2	2.0
T	voor	35.6	35.4	22.0	2.0
	voor*			26.3	
	achter	25.3	20.8	12.0	2.0
	gemiddelde	28.7	25.5	15.3	2.0

De hoogste temperaturen aan de voorzijde zijn bij het absorberende pak gemeten, terwijl de laagste temperaturen aan het reflecterende pak zijn gemeten. De temperatuur van de onderkleding ligt bij alle drie pakken dichter bij de huidtemperatuur dan bij de paktemperatuur. Het verschil tussen onderkleding en huid (voor) is niet significant. Ook aan de achterzijde worden de hoogste temperaturen bij het absorberende pak gevonden. Het verschil met de andere twee pakken is echter beduidend kleiner dan aan de voorzijde.

5.3.4 Warmte-overdrachtscoëfficiënten

Voor het berekenen van de warmte-overdrachtscoëfficiënten zijn de formules uit 3.3.4 gebruikt. In Tabel XV zijn de warmte-overdrachtscoëfficiënten van de drie verschillende pakken weergegeven.

Tabel XV Isolatiewaarden van het absorberende (A), reflecterende (R) en transmitterende (T) pak in m^2°C/W.

	h_{lucht}	h_{pak}	h_{totaal}
A	14.5	11.0	6.9
R	16.0	11.0	7.1
T	20.6	12.0	8.3

De warmte-overdrachtscoëfficiënten van het absorberende en reflecterende pak zijn nagenoeg identiek. Het transmitterend pak heeft een hogere warmte-overdrachtscoëfficiënt voor de lucht dan de andere twee pakken. De verschillen tussen de drie pakken zijn echter niet groot.

5.3.5 Gemeten versus berekende temperaturen

Bij berekening van de kledingtemperaturen aan de hand van het stralingsmodel (1.2.1-1.2.3) dienen een aantal parameters ingevoerd te worden. De waarden voor de parameters staan in 3.3.5. In Fig. 10 is de gemeten kledingtemperatuur uitgezet tegen de berekende temperatuur, de temperaturen staan weergegeven in Tabel XVI.

Tabel XVI Gemeten en voorspelde temperaturen (°C) en droge warmtestroom (W/m^2) bij lopen (4 km/uur) in wind (0.5 m/s). A = absorberend pak, R = reflecterend pak, T = transmitterend pak.

	berekend			gemeten		
	T_{okl}	T_{kl}	droge warmte-stroom	T_{okl}	T_{kl}	droge warmte-stroom
straling						
A	34.6	29.6	132	35.8	34.0	117
R	29.5	26.8	120	29.8	27.2	119
T	36.3	23.1	129	35.4	26.3	124
geen straling						
A	22.5	15.5	112	24.0	16.7	114
R	22.7	15.9	109	23.6	16.3	120
T	20.4	15.0	133	21.9	15.4	128

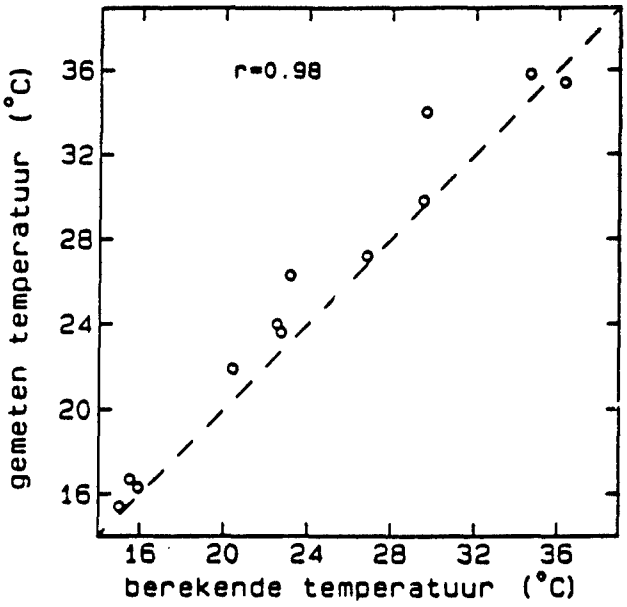

Fig. 10 Gemeten versus berekende temperatuur van onder- en bovenkleding voor drie verschillende ensembles (A, R en T) met en zonder zon.

De paktemperatuur en onderkledingtemperatuur komen berekend en gemeten goed met elkaar overeen, evenals de droge warmte-afgifte. Gemiddeld bedraagt het temperatuurverschil 1.2°C (SD = 1.4) en het verschil in droge warmte-afgifte van de huid 2.2 W (SD = 8.6).

5.4 Discussie

Niet-zon-conditie

De temperatuur van huid, onder- en bovenkleding liggen voor het transmitterende pak 1 à 2°C lager dan voor het absorberende en reflecterende pak. De isolatie van het transmitterende pak is dan ook lager dan van de andere twee pakken. De paktemperatuur van het absorberende pak ligt zowel aan de voor- als aan de achterzijde lager dan de paktemperatuur in het voorgaande experiment bij lopen. De omgevingstemperatuur was in het voorgaande experiment dan ook 1.9°C hoger en er was geen wind aanwezig. De temperaturen voor huid en onderkleding verschillen

aan de achterzijde niet in beide experimenten, zodat de lagere temperaturen aan de voorzijde in het tweede experiment toe te schrijven zijn aan de aanwezigheid van wind (.5 m/s).

Zon-conditie
De hoogste paktemperatuur wordt gemeten aan het absorberende pak. Dit is ook te verwachten omdat dit pak de hoogste absorptiecoëfficiënt heeft en dus de meeste warmte absorbeert. Huid en onderkledingtemperatuur zijn aanzienlijk lager bij het reflecterende pak dan bij de andere twee pakken. Het reflecterende pak werkt dus beschermend tegen warmtestraling. Het transmitterende pak heeft een lage paktemperatuur, door de lage absorptiecoëfficiënt en een hoge onderkledingtemperatuur, door de hoge transmissie van het pak.

Isolaties
De lagere totale pakisolatie van het transmitterende pak wordt veroorzaakt door het feit dat de transmitterende stof zeer los geweven is, waardoor de wind er direct doorheen blaast, wat ook een geringere luchtisolatie tot gevolg heeft. De gevonden luchtisolatie van het absorberende pak is identiek aan die in het voorgaande experiment, maar de intrinsieke isolatie is marginaal lager. Op grond van de lichte wind in het tweede experiment zou eerder verwacht worden dat de luchtisolatie wat groter en de pakisolatie gelijk zou zijn. Deze verschillen moeten toegeschreven worden aan experimentele onzekerheid.

Stralingsmodel
De verschillen tussen de temperaturen berekend met het model en gemeten tijdens het experiment zijn kleiner dan 2.9°C. Het model geeft dus een goede voorspelling van de temperatuur. Ook de warmtestromen worden goed voorspeld. Hierbij is de gemeten droge warmtestroom niet hoger dan de voorspelde warmtestroom, zoals in het eerste experiment, omdat het effect van zwaaien van de armen (waardoor meer warmte via de handen afgevoerd kan worden) overstemd wordt door de wind.

6 VENTILATIE

6.1 Theorie en achtergronden van de ventilatie-metingen

Een methode om de ventilatie van kleding te meten, is beschreven door Lotens en Havenith (1988). Hierbij wordt door middel van een slangensysteem (distributie harnas) een tracergasmengsel onder de kleding

geblazen. Na volledige menging van het gas onder de kleding wordt door een tweede slangensysteem lucht afgezogen (sample harnas), waarin de concentratie tracergas bepaald wordt. Deze methode is gebaseerd op het principe van de massabalans, waarbij in evenwichtsituatie geldt dat de totale massa tracergas die verloren gaat met de ventilatie gelijk is aan de instroom onder de kleding.

$$fl_i \; C_{gas} = vent \; C_{mi} \qquad [g/min] \qquad (44)$$

waarbij

fl_i	: instroom van puur gas	[l/min]
C_{gas}	: concentratie van puur tracergas	[g/l]
C_{mi}	: concentratie tracergas in het microklimaat	[g/l]
vent	: ventilatie onder de kleding	[l/min]

Het distributie harnas zorgt voor een gelijkmatige verdeling van het gas onder de kleding doordat het aantal slangetjes en de lengte gevarieerd zijn afhankelijk van het lichaamsoppervlak. In Fig. 11 is een schematische voorstelling van het meetsysteem weergegeven. Om te voorkomen dat het zwaardere tracergas onder de kleding vandaan "lekt", wordt het tracergas vermengd met lucht zodat de concentratie en specifieke dichtheid de verwachte waarden in het microklimaat hebben. Met behulp van de massaspectrometer worden de concentraties tracergas bepaald terwijl de ventilator zorgt voor de instroom van het tracergas onder de kleding.

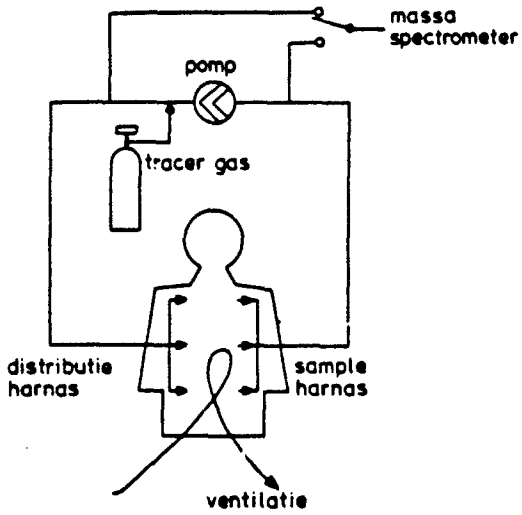

Fig. 11 Schematische voorstelling van het meetsysteem voor de bepaling van kledingventilatie door middel van tracergas-verdunning.

Voor een juiste bepaling van de massabalans dient de vergelijking gecorrigeerd te worden voor het feit dat bij een instroom van tracergas een hoeveelheid lucht onder de kleding zal verdwijnen en het feit dat op verschillende plaatsen onder de kleding geventileerd wordt met lucht uit het microklimaat in plaats van uit de omgeving.
De massabalans wordt dan:

$$(fl_i + fl)\ C_{in} + vent\ C_{omg} = (vent + fl_i + fl)\ C_{uit} \qquad (45)$$

fl	: circulerende stroom over de ventilator	[l/min]
C_{in}	: concentratie tracergas in het distributie harnas	[g/l]
C_{omg}	: concentratie tracergas in de directe omgeving	[g/l]
C_{uit}	: concentratie tracergas in het sample harnas	[g/l]

De ventilatie is dus:

$$vent = \frac{(fl_i + fl)\ (C_{in}/C_{uit} - 1)}{1 - C_{omg}/C_{uit}} \qquad [l/min] \qquad (46)$$

In Fig. 12 zijn de stromen en concentraties schematisch weergegeven. Als tracergas is Ar gebruikt.

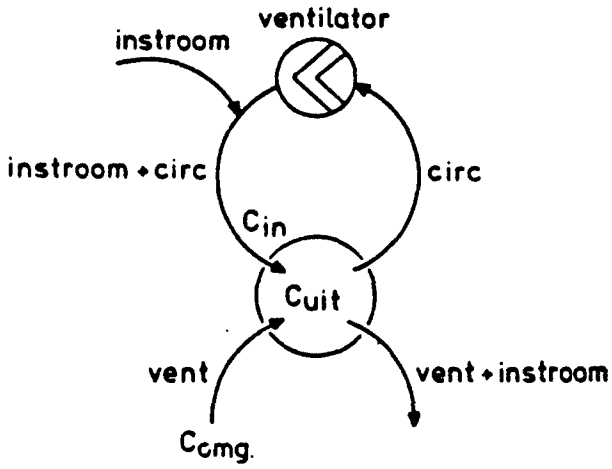

Fig. 12 Schematische voorstelling van de luchtstromen en de resulterende concentraties tracergas.

De ventilatie is apart gemeten en berekend voor de broek en de jas volgens:

$$vent_{jas} = .39\ (fl + fl_i)\ ((C_{in} - C_{jas})/C_{jas} - C_{omg}))/.65 \qquad [l/m^2min] \qquad (47)$$

met

C_{jas}: concentratie tracergas onder de jas

waarbij 39% van de circulerende stroom gedistribueerd wordt over het bovenlichaam met een oppervlakte van .65 m^2.

$$vent_{broek} = .61\ (fl + fl_i)\ ((C_{in} - C_{broek})/(C_{broek} - C_{omg}))/.85 \qquad [l/m^2min] \qquad (48)$$

met

C_{broek}: concentratie tracergas onder de broek

waarbij 61% van de circulerende stroom gedistribueerd wordt over het onderlichaam met een oppervlakte van .85 m^2.

Voor het totale kledingoppervlak geldt:

$$vent_{tot} = .34\ vent(jas) + .47\ vent(broek)/.81 \qquad [l/m^2min] \qquad (49)$$

Met behulp van de ventilatie is het mogelijk de diffusieweerstand voor waterdamp van het pak te berekenen, uitgedrukt in de weerstand voor waterdamp van een equivalente stilstaande luchtlaag.

$$d_{pak} = \mathbb{D}*60000 \ / \ vent_{tot} \qquad [m] \qquad (50)$$

waarbij $\mathbb{D}$ de diffusieconstante voor argon in lucht is met een waarde van 18 10^{-6} m^2/s.

6.2 Experimentele bepaling van de ventilatie

6.2.1 Inleiding

Met behulp van de tracergasmethode is de diffusieweerstand (d) en de ventilatie voor waterdamp van de drie pakken bepaald. Bepaling van de ventilatie is van belang daar de ventilatie één van de parameters uit het stralingsmodel is. In de experimenten is de natte warmtestroom buiten beschouwing gelaten. Indien de natte warmtestroom wel in het experiment wordt opgenomen (door de proefpersonen niet in het PVC-folie te wikkelen), is het voor de berekening van de warmtestromen en temperaturen wel van belang dat de diffusieweerstand van de kleding bekend is.

6.3 Materiaal en methode

Twee proefpersonen namen deel aan dit onderzoek. Hun fysieke kenmerken staan weergegeven in Tabel XVII.

Tabel XVII Fysieke kenmerken van de proefpersonen.

pp	lengte (m)	gewicht (kg)	DuBois lichaamsoppervlak (m^2)
1	1.78	72	1.89
2	1.84	74	1.96

Zij droegen een laag lang ondergoed (100% katoen) waarop het ventilatieharnas bevestigd werd. Over dit harnas droegen zij de drie pakken beschreven in 4.2.2 (een absorberend, reflecterend en transmitterend pak). Van deze drie pakken is de diffusieweerstand en de ventilatie bepaald bij staan zonder wind, staan met weinig wind (.5 m/s), staan met meer wind (1.0 m/s) en lopen met weinig wind.

6.4 Resultaten

In Tabel XVIII zijn de gemiddelde ventilatiewaarden en de diffusieweerstanden van de drie pakken samengevat uitgedrukt in m/s respectievelijk mm luchtequivalent.

Tabel XVIII Ventilatie (vent, 10^{-4} m/s) er dampweerstand (d,mm) voor het absorberende (A), reflecterende (R) en transmitterende (T) pak bij verschillende condities.

activiteit	A		R		T	
	vent	d	vent	d	vent	d
staan	9	20	1.8	16	19	9.5
staan in 0.5 m/s wind	11.3	16	15	12	36	5
staan in 1.0 m/s wind	15	12	24	7.5	72	2.5
lopen in 0.5 m/s wind	24	7.5	30	6	60	3

Voor alle drie de pakken geldt dat de laagste ventilatie gemeten wordt bij staan zonder wind, hoger naarmate er meer wind is, en de hoogste ventilatie bij lopen. De verschillen tussen de pakken voor de verschillende condities zijn aanzienlijk. Met name het transmitterende pak heeft veel hogere ventilatiewaarden dan het reflecterende pak, dat weer iets meer ventileert dan het absorberende pak.
Wind en lopen verlagen het luchtequivalent van de kleding. Het effect van lopen (4 km/uur) is groter dan het effect van wind (1 m/s) voor het absorberende pak, terwijl voor het reflecterende en absorberende pak de invloed even groot is.

6.5 Discussie

Proefpersoon 1 heeft over het algemeen een hogere ventilatie dan proefpersoon 2. Proefpersoon 1 is dan ook iets kleiner en smaller dan proefpersoon 2, waardoor er meer ruimte onder zijn pak zat hetgeen de ventilatie bevordert. De gemeten ventilatie bestaat niet alleen uit pure ventilatie, maar ook voor een deel uit diffusie. Hoe permeabeler het pak, hoe meer diffusie optreedt. De gemeten ventilaties bij staan in wind en lopen zijn echter zo groot, dat het aandeel van de diffusie relatief gering is.
Het absorberende pak heeft de hoogste waarde voor d_{xi} dus de laagste permeabiliteit voor waterdamp. De verlaging van de dampweerstand door wind (1.0 m/s) en lopen (1.1 m/s) is van gelijke grootte voor het transmitterende en reflecterende pak. Voor het absorberende pak geldt echter dat lopen de dampweerstand meer verlaagt dan de wind. De stof van het absorberende pak is ook steviger dan van de andere twee pakken waardoor er minder lucht door de stof heengaat.
Vergelijking van de gevonden ventilatiewaarden van de drie pakken met literatuurgegevens toont goede overeenkomsten met metingen door Havenith en Heus (1988). Het transmitterende pak heeft echter hogere ventilatie, hetgeen ook verwacht wordt op grond van de openheid van de stof. Lotens en Havenith (1988) bepaalden de ventilatie voor regenkleding. Deze ventilatiewaarden liggen aanzienlijk lager dan de in dit experiment gemeten ventilatie, door de impermeabiliteit van de regenkleding.

7 DISCUSSIE

Het beschreven stralingsmodel gaat uit van de intensiteit van de invallende straling en berekent vervolgens warmtestromen en temperaturen in kleding. Het model van Roller en Goldman (1968) berekent de invallende straling als functie van directe straling, diffuse straling en terreinreflectie en bepaalt de hoeveelheid straling die daadwerkelijk de huid bereikt. Experimenteel is dit model getest door Breckenridge en Goldman (1972), door de warmtestroom met een manikin te bepalen. Het probleem bij deze experimenten was dat er foutieve metingen optraden indien de manikin warmte uit de omgeving op zou nemen in plaats van warmte afstaan. Roller en Goldman hebben de invallende

straling nauwkeurig beschreven, hetgeen in het hierbeschreven stralingsmodel opgenomen zou kunnen worden. Daarnaast zou aan het stralingsmodel een thermoregulatiemodel gekoppeld kunnen worden.
De voorspelde temperaturen met behulp van het stralingsmodel komen goed overeen met de gemeten waarden in de bovenbeschreven experimenten. Er is slechts één serieuze afwijking: experiment 1 (Par. 3), voorzijde, zon, buitenkant pak, staan in wind. Het gemiddelde verschil tussen gemeten en berekende temperaturen bedraagt 0.4°C (SD = 1.9). Naast temperaturen berekent het model ook warmtestromen. Eén van deze warmtestromen is de droge warmte-afgifte van de huid. Deze warmtestroom is ook experimenteel bepaald en het verschil bedraagt gemiddeld 0 W (SD = 13).
In het model worden een aantal gegevens ingevoerd (Tabel I). Voor deze parameters is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waaruit blijkt dat de reflectiecoëfficiënt van de bovenkleding de meeste invloed heeft op de warmte-afgifte. Een toename van .2 van deze coëfficiënt resulteert in een toename van 15% in droog warmteverlies van de huid. Ook de windsnelheid speelt een belangrijke rol in het model. Een verdubbeling van de windsnelheid is te vergelijken met een toename van .2 in reflectiecoëfficiënt van de bovenkleding. De overige parameters zijn van minder belang, hetgeen met name geldt voor de absorptie- en transmissiecoëfficiënten, die de verdeling van de geabsorbeerde warmte over buiten- en onderkleding bepalen. Deze verdeling is niet kritisch. Ook de wijdte van de kleding, zoals die tot uiting komt in de dikte van de luchtspleet is niet zo bepalend. Ventilatie is in de praktijk ondergeschikt aan de directe effecten van wind en beweging.
Hettinger et al. (1984) bepaalden temperaturen van vier kledingensembles bij een straling van 750 W/m^2. De kledingensembles bestonden uit een hemd, overhemd, sokken en veiligheidsschoenen. Hierover werden afhankelijk van het kledingtype verschillende kledingstukken gedragen. Een broek (a), een gietpak (b), een tweedeling katoenen pak met een hittebestendige jas van asbest (c) en een tweedelig wollen pak met een hittebestendige jas van wol (d). Van de kleding waren echter de betreffende absorptie-, reflectie- en transmissiecoëfficiënten niet bekend en zijn geschat aan de hand van foto's en materiaalbeschrijving. In Fig. 13 zijn de berekende temperaturen met het stralingsmodel uitgezet tegen de gemeten temperaturen. Ook bij de grove schatting van de invoerparameters blijkt er een behoorlijke overeenkomst te bestaan.

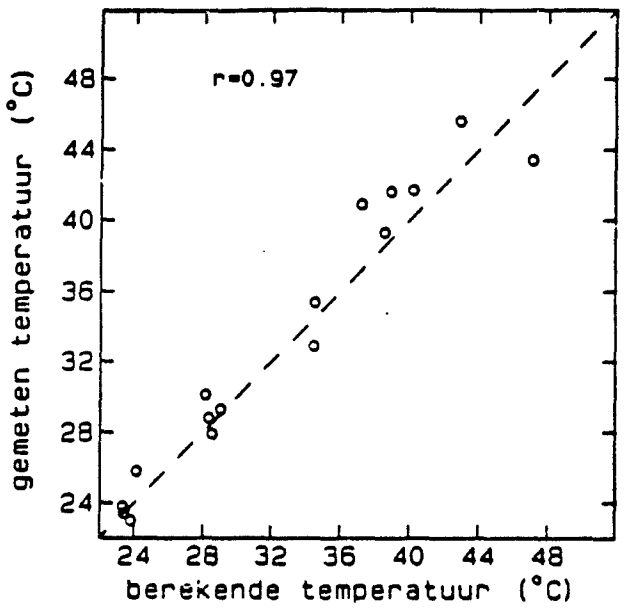

Fig. 13 Gemeten versus berekende temperatuur van onder- en bovenkleding voor vier industriële kledingensembles (Hettinger et al., 1984) met en zonder zon.

Clark en Cena (1974) beschrijven een fysisch model van het lokale warmtetransport in de vacht van dieren. Het model voorspelt de lokale warmtebalans in de vacht afhankelijk van straling, huidtemperatuur en stralingstemperatuur van de vacht. Het model beschrijft de warmtehuishouding in de vacht kwalitatief goed. Om het model echter kwantitatief sluitend te maken, dienen zeer hoge warmtegeleidingen voor vacht en aanhangende lucht ingevoerd te worden. Zij berekenden voor de vacht een specifieke geleiding van 0.19 W/m°C en voor de aanhangende lucht een waarde van 1 W/m°C. De maximale specifieke geleiding van de aanhangende luchtlaag die voor de mens gemeten is, bedraagt 0.14.
Nielsen (1989) bepaalde de warmtebelasting voor geklede mensen tijdens arbeid. De gedragen kleding verschilde in kleur (zwart-wit) en materiaal (katoen - polyester). De reflectie-, absorptie- en transmissiecoëfficiënten zijn verschillend in het langgolvige en in het kortgolvige gebied van het elektromagnetisch spectrum. Van de coëfficiënten in het infrarood is echter een zeer grove schatting gemaakt. Daarnaast geldt dat slechts 12% van het lichaamsoppervlak is aangestraald waardoor de effectieve warmte van de zon gering is (ca. 100 W/m^2). In de hierbeschreven experimenten werd een veel groter deel van het lichaam aange-

straald (ca. 33%), zodat het effect van de zon veel duidelijker zichtbaar is. Bovendien zijn de kledingtemperaturen van Nielsen vertroebeld doordat de kleding tijdens het experiment doordrenkt was met zweet. Dit kan ook een probleem vormen bij een volgend experiment, waarbij de proefpersonen niet meer in het plastic gewikkeld worden, zodat naast de droge warmtestroom ook de natte warmtestroom bepaald wordt.
Het model is dus een bruikbaar instrument gebleken voor voorspelling van warmte-afgifte tijdens straling, zowel voor wind en beweging als voor verschillende kledingsoorten. Indien de warmte-afgifte van de huid in de drie condities staan, staan in wind en lopen met elkaar vergeleken worden, blijkt dat tijdens staan in de zon (550 W/m^2) er warmte naar de huid toestroomt, bij lopen is er nagenoeg geen afgifte, en bij wind kan er warmte van de huid afgegeven worden. De absorberende en transmitterende kleding uit experiment II geven nagenoeg dezelfde warmtelast bij lopen in de zon (800 W/m^2), maar reflecterende kleding veel minder.

REFERENTIES

Breckenridge, F.R. en Goldman, R.F. (1972). Human solar heat load. ASHRAE Trans.

Breckenridge, J.R. en Pratt, R.L. (1961). Effect of clothing color on solar heat load. Natick, Mass.: Quartermaster R & E Command, US Army Natick Lab., Tech. Rept. EP-155.

Cain, B. en Farnworth, B. (1986). Two new techniques for determining the thermal radiative properties of thin fabrics. J. of Therm. Insul. 9, 301-322.

Cena, K. en Clark, J.A. (1974). Heat balance and thermal resistance of sheep's fleece. Phys. Med. Biol., 19(1), 51-65.

Clark, J.A. en Cena, K. (1978). Net radiation and heat transfer through clothing: the effects of insulation and colour. Ergonomics 21, 691-696.

Clark, J.A., Cena, K. en Monteith, J.L. (1973). Measurements of the local heat balance of animal coats and human clothing. J. Appl. Physiol. 35, 751-754.

DuBois, D. en DuBois, E.F. (1916). Clinical calorimetry: A formula to estimate the appropriate surface area if height and weight be known. Archiv internal. Med. 17, 863-871.

Fanger, P.O. (1970). Thermal comfort: analysis and applications. McGraw-Hill, New York.

Gosselin, R.E. (1947). Heat exchange en the desert in: Physiology of man in the desert, Ed. E.F. Adolph (New York: Interscience).

Havenith, G. en Heus, R. (1988). Effect van houding, beweging en wind op de kledingisolatie. Rapport Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, IZF 1988 C-28.

Henschel, A. en Hanson, H.E. (1960). Heat stress in a desert environment. Am. Soc. Mech. Eng. Paper 59-A-210.

Hettinger, Th., Eissing, C., Hertting, R. en Steinhaus, I. (1984). Belastung und Beanspruchung durch das Tragen persönlicher Schutzausrüstung Teil II: Untersuchung von Schutzkleidungen bei Warmestrahlungsexposition. FC 392 BdI. Schnittenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Dortmund.

Lotens, W.A. en Havenith, G. (1989). Calculation of clothing insulation and vapour resistance. Rapport Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, IZF 1989-49.

Lotens, W.A. en Havenith, G. (1988). Ventilation of rainwear determined by a trace gas method. Environmental Ergonomics, Mekjavics IB, Bannister BW en Morrison J.B. eds Taylor and Francis, London, 192-17.

Lotens, W.A., Havenith, G. en Wammes, L.J.A. (1988). Prediction of thermal discomfort of CW-assemblies based on fabric measurements. Rapport Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, IZF 1988 C-13.

McIntyre, D.A. (1976). Radiant heat load from lights, and its effect on thermal comfort. Lighting Res. Technol. 8, 121-128.

Nielsen, R., Olesen, B.W. en Fanger, P.O. (1985). Effect of physical activity and air velocity on the thermal insulation of clothing. Ergonomics 28, 1617-1632.

Nielsen, B., Kasson, K. en Aschengreen, F.E. (1988). Heat balance during exercise in the sun. Eur. J. Appl. Physiol. 58, 189-196.

Nielsen, B. (1989). Solar heat load: heat balance during exercise in clothed subjects. Manuscript voor Eur. J. Appl. Physiol.

Olesen, S., Fanger, P.O., Jensen, P.B., and Nielsen, O.J. (1972). Comfort limits for man exposed to asymmetrical thermal radiation. Pre symp thermal comfort and moderate heat stress. Building Res Station, London, 133-148.

Olesen, B.W., Sliwinska, E., Madsen, T.L. en Fanger, P.O. (1982). Effect of body posture and activity on the thermal insulation of clothing: measurements by a movable thermal manikin. ASHRAE Trans. 88, 791-805.

Roller, W.L. en Goldman, R.F. (1968). Prediction of heat load on man. J. Appl. Physiol. 24, 717-721.

Weir, J.B. de (1949). New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. J. Physiol. 109, 1-9.

Soesterberg, 22 januari 1990

Drs. W.A. Lotens

APPENDIX I: Oplossing vergelijkingen blz. 17

De acht vergelijkingen hebben in totaal acht onbekenden. De vergelijkingen zijn opgenomen in een matrix.

$$
\begin{array}{c}
(1)\\(2)\\(3)\\(4)\\(5)\\(6)\\(7)\\(8)
\end{array}
\begin{bmatrix}
1 & -1 & & -1 & & & & \\
 & 1 & -1 & & & -1 & & \\
 & & 1 & 1 & & & -1 & \\
 & & & & & & 1 & -1 \\
 & -B & -C & D & & & & \\
 & & C & & & -F & G & N \\
A & & & D & & & G & N \\
A & & & & E & & &
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \\ i_f \\ i_g \\ i_h \end{bmatrix}
+
\begin{bmatrix} i(f) \\ \\ \\ i(abs) \\ \\ \\ T_{omg}-T_{huid} \\ T_{omg}-T_{huid} \end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix} \\ \\ \\ \\ 0 \\ \\ \\ \end{bmatrix}
$$

Vervolgens zijn dusdanige lineaire transformaties uitgevoerd, dat de matrix onder de diagonaal nullen bevat, bijvoorbeeld door van vergelijking 7 a maal vergelijking 1 af te trekken en van vergelijking 8 eveneens a maal vergelijking 1 af te trekken. De vergelijkingen zijn dan recursief op te lossen, te beginnen met de vergelijking die slechts één variabele bevat. In de voorlaatste vergelijking kan de gevonden waarde voor de variabele uit de laatste vergelijking ingevuld worden en kan de volgende vergelijking opgelost, enz.

De warmtestromen zijn uitgedrukt in W/m^2 De hoeveelheid warmte die door de kleding stroomt is dus afhankelijk van het oppervlak van de betreffende kledinglaag. Hier kan voor gecorrigeerd worden door de weerstanden F, G, N en C te delen door f_{kl} en D, E en B te delen door f_{okl}, waarbij f_{kl} de factor is voor vergroot buitenoppervlak van de bovenkleding ten opzichte van de huid en f_{okl} voor een vergroot buitenoppervlak van de onderkleding ten opzichte van de huid.

f_{kl} = kledingoppervlak bovenkleding/huidoppervlak
f_{okl} = kledingoppervlak onderkleding/huidoppervlak

APPENDIX II: Warmtebalansgegevens

Warmtebalansgegevens (W/m^2) van de twee experimenten per proefpersoon in de zon (+) en niet-zon (-) conditie voor stilstaan (ST), staan in wind (STW) en lopen (L), en de drie pakken, absorberend pak (A), reflecterend (R) en transmitterend pak (T).

	experiment I				
	metab.	resp.	evap.	sto.	dry
ST+	78.900	3.756	8.710	16.631	49.803
	56.020	2.667	8.710	- 1.360	46.003
	69.890	3.327	8.710	9.351	48.502
	71.670	3.411	8.710	7.964	51.585
L+	146.150	6.957	24.160	10.951	104.082
	164.980	7.853	24.160	12.919	120.048
	183.430	8.731	24.160	20.601	129.938
	166.630	7.932	24.160	36.925	97.613
STW+	52.780	1.773	8.710	- 9.787	52.084
	58.670	1.971	8.710	- 2.856	50.845
	61.170	2.055	8.710	- 2.922	53.327
	64.970	2.183	8.710	- 5.792	59.869
L-	155.950	5.240	24.160	7.734	118.816
	159.830	5.370	24.160	11.219	119.081
	190.190	6.390	24.160	33.312	126.328
	149.310	5.017	24.160	15.783	104.350
ST	72.420	2.433	8.710	0.890	60.387
	68.700	2.308	8.710	5.201	52.481
	68.880	2.314	8.710	- 9.497	67.353
	61.530	2.067	8.710	- 1.448	52.201
STW	75.660	1.483	8.710	- 1.904	67.371
	74.940	1.469	8.710	- 3.148	67.909
	65.190	1.278	8.710	- 0.950	56.152
	63.590	1.246	8.710	- 1.665	55.299

experiment II

A+	210.350	10.010	24.160	28.400	147.780
	151.300	7.196	24.160	19.210	100.735
	151.850	7.236	24.160	20.000	100.454
	177.290	8.446	24.160	27.260	117.424
R+	176.850	8.400	24.160	13.830	130.460
	154.780	7.371	24.160	7.540	115.709
	161.640	7.698	24.160	24.910	104.872
	156.790	7.473	24.160	0.000	125.157
T+	200.380	9.545	24.160	15.000	151.675
	153.910	7.332	24.160	12.210	110.208
	146.610	6.975	24.160	10.130	105.345
	175.330	8.342	24.160	14.906	127.922
A-	168.000	5.645	24.160	12.710	125.485
	137.370	4.622	24.160	2.640	105.949
	152.680	5.146	24.160	18.530	104.844
	161.390	5.423	24.160	10.720	121.087
R-	180.080	6.014	24.160	17.860	132.046
	153.730	5.168	24.160	0.000	124.403
	151.000	5.065	24.160	21.160	100.615
	159.750	5.361	24.160	7.170	123.059
T-	186.025	6.247	24.160	12.640	142.978
	145.900	4.895	24.160	- 0.750	117.596
	155.560	5.226	24.160	6.750	119.424
	171.550	5.755	24.160	9.582	132.053

REPORT DOCUMENTATION PAGE

1. DEFENCE REPORT NUMBER (MOD-NL) TD [redacted]-4561	2. RECIPIENT'S ACCESSION NUMBER	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER IZF 1990 B-2
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO. 736.1	5. CONTRACT NUMBER B88-60	6. REPORT DATE January 22, 1990
7. NUMBER OF PAGES 60	8. NUMBER OF REFERENCES 23	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final

10. TITLE AND SUBTITLE

Heat transport in clothing during irradiation with heat

11. AUTHOR(S)

A.M.J. Pieters and W.A. Lotens

12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES)

TNO Institute for Perception
Kampweg 5
3769 DE SOESTERBERG

13. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES)

TNO Division of National Defence Research
Koningin Marialaan 21
2595 GA DEN HAAG

14. SUPPLEMENTARY NOTES

15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS, 1044 BYTE)

A model is suggested to calculate temperatures and heatflows in clothing with one-sided heat radiation. Two clothing layers are taken into account in the model. The model is verified experimentally. In these experiments only the dry heatflow is measured by wrapping the subjects in plastic foil. In the first experiment the influence of radiation (550 W/m^2), wind (1 m/s) and movement (standing or walking 4 km/h) were studied. Wind and movement decrease clothing temperature and insulation. The insulation of the air is mainly influenced by wind whereas the clothing isolation is mainly influenced by movement. The mean difference between the measured and calculated temperatures is 0.4°C (SD = 1.9) and between heatflow 0 W (SD = 13).
In a second experiment the influence of the radiation properties of clothing was determined. The subjects wore absorbing, reflecting, and transmitting garments while walking at a speed of 4 km/h in radiation of 800 W/m^2. In the reflecting garment, the mean skin temperature was 5°C lower than in the absorbing or transmitting garment. The mean difference between measured temperatures and calculated temperatures is 1.2°C (SD = 1.4), and between the heatflows 2.2 W (SD = 8.6).

16. DESCRIPTORS	IDENTIFIERS
Protective Clothing Heat Mathematical Models Thermal Properties	Heat Radiation Temperature

17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT) -	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE) -	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT) -
18. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES)

VERZENDLIJST

1. Hoofddirecteur van de Hoofdgroep Defensieonderzoek TNO

2. Directie Wetenschappelijk Onderzoek en Ontwikkeling Defensie

3. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KL
   Plv. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KL

4,5. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KLu

6. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KM
   Plv. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KM

7. Wnd. Hoofd Afd. Militair Geneeskundig Beleid

8. Inspecteur Geneeskundige Dienst KL
   Brig.Gen.-arts B.C. Mels

9. Inspecteur Geneeskundige Dienst KLu
   Cdre J.Th. Versteeg

10. Inspecteur Geneeskundige Dienst Zeemacht
    Cdr-arts A.J. Noordhoek

11, 12, 13. Hoofd van het Wetensch. en Techn. Doc.- en Inform. Centrum voor de Krijgsmacht

LEDEN WAARNEMINGS CONTACT COMMISSIE

14. Maj.Ir. W.C.M. Bouwmans
15. LTZAR1 F.D.J.R. Feunekes
16. Dr. N. Guns
17. Drs. C.W. Lamberts
18. Ir. P.H. van Overbeek
19. Drs. W. Pelt
20. Maj. dierenarts H.W. Poen
21. Drs. F.H.J.I. Rameckers
22. LTZSD2OC KV Drs. M.B.A.M. Scheffers
23. Prof.Ir. C. van Schooneveld
24. LKol.Drs. H.W. de Swart
25. Ir. M. Vertregt
26. Kol. vliegerarts B. Voorsluijs

Extra exemplaren van dit rapport kunnen worden aangevraagd door tussenkomst van de HWOs of de DWOO.